GUSTAVO TRESSIA DE ANDRADE

Resistência à abrasão de aço Hadfield para britadores – efeito do
tamanho do abrasivo e do pH do meio

SÃO PAULO
2015

GUSTAVO TRESSIA DE ANDRADE

Resistência à abrasão de aço Hadfield para britadores – efeito do tamanho do abrasivo e do pH do meio

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

SÃO PAULO
2015

GUSTAVO TRESSIA DE ANDRADE

Resistência à abrasão de aço Hadfield para britadores – efeito do
tamanho do abrasivo e do pH do meio

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Mecânica de
Projeto e Fabricação

Orientador:
Prof. Titular Amilton
Sinatora

SÃO PAULO
2015

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 26 de junho de 2015

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Andrade, Gustavo Tressia

Resistência à abrasão de aço Hadfield para britadores – efeito do tamanho do abrasivo e do pH do meio / G. Tressia – versão corr. -- São Paulo, 2015.
128 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Desgaste abrasivo 2.Aço Hadfield I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Professor Titular Amilton Sinatora, pela confiança e oportunidade de trabalhar ao seu lado, pelos valiosos ensinamentos, contribuindo para a minha formação profissional, acadêmica e pessoal e pelo apoio a este e inúmeros outros trabalhos.

Ao amigo Jose Jimmy Penagos, pelas inúmeras e valiosas discussões, aos amigos Fabio do Nascimento, Leandro de Paula, Raquel Nunes e Francisco Faustino, pelas instruções no dia-a-dia do laboratório, aos amigos Victor Moreira, Alexander Zuleta, Paulo Machado, Luiz Franco, André Zuin, Juan Sebastian Acero e Juan Ignacio pelos valiosos comentários e suporte e a todos os demais amigos e integrantes do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) pelos momentos de aprendizado e companheirismo.

À CNPQ pelo suporte financeiro à realização deste trabalho (Bolsa de mestrado - processo 381111/2013-0).

À empresa Vale, na pessoa do Sr. Ronaldo Jabour, pelo apoio e suporte financeiro à realização deste trabalho, por meio do financiamento do projeto TRIBOVALE, este sendo uma parceria com Instituto Nacional de Engenharia de Superfícies (INES).

A Professora Carina Ulsen do Laboratório de Caracterização Tecnológica, do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP pela caracterização de tamanho e forma dos abrasivos.

A minha mãe Katia Tressia por sempre incentivar e apoiar meus estudos, me amparando de todas as formas e com toda brandura possível. A minha namorada Ana Carolina, pelos momentos de companheirismo, paciência e carinho.

Resumo

Neste trabalho, foi investigado o efeito do tamanho do abrasivo e do pH do meio na resistência ao desgaste abrasivo do aço H-13 com matriz martensítica e do aço Hadfield com matriz austenítica. Ensaios de abrasão foram realizados utilizando o equipamento roda de borracha a úmido, variando o tamanho do abrasivo entre 0,15 e 2,40 mm e o pH do meio entre 5,5 e 12,8. As microestruturas dos materiais estudados foram analisadas utilizando microscopia óptica, as superfícies de desgaste e as partículas de desgaste foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura. A macrodureza e a microdureza, antes e após os ensaios, foram obtidas utilizando durômetro Vickers. A topografia da região central da superfície de desgaste foi obtida utilizando Perfilometria 3D, visando obter valores de profundidade de penetração do abrasivo. Os resultados mostraram que o aço Hadfield é mais resistente do que o aço H-13 em todos os valores de pH e tamanhos de abrasivo utilizados. Para os dois materiais, a perda de massa aumenta linearmente até um tamanho crítico de abrasivo (TCA) e, após este, a mesma continua a aumentar, mas com uma intensidade menor. Para os dois materiais e para todos os tamanhos de abrasivo, o aumento do pH do meio resultou em menores perdas de massa, sendo este efeito maior para os dois menores tamanhos de abrasivo. Para maiores valores de pH, foram observadas menores profundidades de penetração do abrasivo. A microdureza da superfície de desgaste do aço H-13 sofreu um pequeno aumento com o aumento do tamanho do abrasivo enquanto que para o aço Hadfield esse aumento foi mais intenso. A análise das partículas de desgaste mostraram que, para todas as condições ensaiadas, os debris do aço H-13 tinham duas morfologias, contínuas e descontínuas enquanto que os cavacos do aço Hadfield foram sempre descontínuos. Para os dois materiais, foram observados dois micromecanismos de desgaste, sendo eles microcorte e microsulcamento. Por fim, os resultados apresentados neste trabalho sugerem que a análise de desempenho do aço Hadfield em serviço deve considerar o pH do meio bem como a granulometria do abrasivo em contato.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo, tamanho do abrasivo, pH do meio, aço Hadfield, aço H-13, micromecanismos de desgaste.

Abstract

In this work, the effects of abrasive particle size and pH value of the aqueous solution on abrasive wear resistance of the H-13 steel with martensitic matrix and the Hadfield steel with austenitic matrix were investigated. Abrasive wear tests, using a wet rubber wheel abrasion tester, were carried out using abrasive sizes between 0.15 and 2.40 mm and pH values of the aqueous solution between 5.5 and 12.8. The microstructures of the materials studied were analyzed by optical microscopy and the wear surfaces and wear particles were analyzed by scanning electron microscopy. The hardness and microhardness before and after the tests were measured using a Vickers hardness tester. The topography of the middle of wear scars, were obtained by a non-contact 3D profiler in order to measure the depth of abrasive penetrations. The results show that the Hadfield steel is more wear resistant than the H-13 steel at all pH values and abrasive sizes conditions tested. For both materials, mass loss increases linearly up to a critical abrasive size, and after this the mass loss continues to increase, but with a lower intensity. Moreover, for both materials and all the abrasive sizes, increases in the pH values of the aqueous solution resulted in lower mass losses, and this effect is greater for the two smaller grain sizes. For higher pH values, lower depths of penetration of abrasive were observed. The microhardness in the wear scar surface of the H-13 steel presented a slight increase with the abrasive size, while for the Hadfield steel, this microhardness increases in a more intense form with the abrasive size. The analysis of the wear particles showed that, for all test conditions, the chips of H-13 steel has two types of morphologies, continuous or discontinuous, and for Hadfield steel only discontinuous. For both materials, two abrasive wear micromechanisms were observed, microcutting and microploughing. Finally, the results presented in this work suggest that the wear performance analysis of the Hadfield steel, to be used in an abrasive environment, must consider the effects of pH of the aqueous solution and particle size.

Keywords: Abrasive wear, Abrasive size, pH of the aqueous solution, Hadfield steel, H-13 steel, wear micromechanism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismos de desgaste abrasivo (adaptado de ZUM GAHR 1987).....	5
Figura 2 – Variação da taxa de desgaste em função do tamanho do abrasivo para ensaios de abrasão a dois corpos (adaptado de AVIENT et al. 1960).	6
Figura 3 - Relação entre as taxas de desgaste e o tamanho do abrasivo em ensaios de abrasão a três corpos (Adaptado de RABINOWICZ et al. 1961).	7
Figura 4 – Taxa de desgaste em ensaios de abrasão a dois corpos em função do tamanho do abrasivo utilizando diferentes cargas aplicadas para: a) Níquel , b) Aço AISI 1095 (Adaptado de SIN et al. 1979).	8
Figura 5 – Taxa de desgaste de amostras de Molibdênio em função do tamanho do abrasivo para diferentes cargas aplicada em ensaios de abrasão a três corpos (adaptado de Miller 1980).	9
Figura 6 – Taxa de desgaste em função do tamanho do abrasivo para velocidades de deslizamento de 200 mm/s e 0,2 mm/s em ensaios de abrasão a dois corpos (Adaptado de MISRA e FINNIE 1981).	9
Figura 7 – Taxa de desgaste em função do tamanho do abrasivo para abrasão a dois corpos, três corpos e erosão (Adaptado de MISRA e FINNIE 1981).	10
Figura 8 – Coeficiente de desgaste em função do tamanho do abrasivo para meios úmido e seco em ensaios de abrasão a três corpos (adaptado de WIROJANUPATUMP e SHIPWAY 2000).	12
Figura 9 – Taxa de desgaste em função do tamanho do abrasivo para ligas de alumínio submetidas a ensaios de abrasão a dois corpos (adaptado de DAS et al. 2008).	13
Figura 10 – Perda volumétrica em função do tamanho do abrasivo para diversos aços submetidos a ensaios em roda de borracha (Adaptado de Chacon-Nava et al. 2010). .	14
Figura 11 – Perda de massa após ensaio de abrasão a dois corpos em função do tamanho de abrasivo para diferentes distâncias percorridas (CORONADO e SINATORA 2011a).	15
Figura 12 – MEV da lixa evidenciando as partículas de desgaste após ensaio de abrasão a dois corpos para tamanhos de abrasivo de (a) 23,6 µm e (b) 116,0 µm (CORONADO e SINATORA 2011a).	16

Figura 13 – Volume perdido em função do tamanho do abrasivo para diferentes cargas aplicadas em ensaios de abrasão a três corpos (TOZETTI et al. 2013).....	17
Figura 14 - Representação esquemática do efeito do tamanho do abrasivo na taxa de desgaste (adaptado de CORONADO e SINATORA 2011a).....	18
Figura 15 - Perda de massa em função do tamanho do abrasivo para materiais com estruturas cristalinas diferentes, CFC (alumínio) e CCC (aço 1045). (Adaptado de CORONADO e SINATORA 2011b).....	26
Figura 16 – Relação entre perda de massa e tamanho de abrasivo para ferro fundido branco de matriz martensítica e de matriz austenítica (adaptado de CORONADO e SINATORA 2011a).	27
Figura 17 – (a) Abrasômetro roda de borracha a úmido e (b) diagrama esquemático do ensaio (adaptado de ASTM G-105), em que a roda revestida com borracha diâmetro apresenta diâmetro de 228 mm.	34
Figura 18 - Dispositivo magnético para coleta de partículas de desgaste.....	34
Figura 19 - pHmetro Digital Gehaka utilizado nas medições de pH.	36
Figura 20 – Micrografia do Aço H-13, com matriz martensítica, atacada com Nital 2 % e com aumento de 1000x.	37
Figura 21 – Micrografia do Aço Hadfield, com matriz austenítica atacado com reagente Nital 2 % e com aumento de 100X.....	38
Figura 22 – MEV dos abrasivos, com tamanho de: (a) #100 (0,15 a 0,30 mm); (b) #50 (0,30 a 0,60 mm); (c) #30 (0,60 a 1,20 mm); (d) #16 (1,20 a 2,40 mm).	41
Figura 23 – Perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 em função do tamanho do abrasivo e do pH da solução aquosa. Não é possível visualizar algumas barras de desvio padrão devido ao pequeno valor apresentado.....	42
Figura 24 – Perda de massa média (3 repetições) do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo e do pH da solução aquosa. Não é possível visualizar algumas barras de desvio padrão devido ao pequeno valor apresentado.	43
Figura 25 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5. Não é possível visualizar algumas barras de desvio padrão devido ao pequeno valor apresentado.	45

Figura 26 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 7,0. Não é possível visualizar algumas barras de desvio padrão devido ao pequeno valor apresentado.	46
Figura 27 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 e do aço Hadfield em função da granulometria do abrasivo para ensaios com pH 12,8	47
Figura 28 - Perfil de microdureza do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo	51
Figura 29 – Imagem do perfil de microdureza do aço Hadfield obtida em microscópio óptico com aumento de 500x.	52
Figura 30 – Perfil de dureza de 4 regiões de uma amostra de britador de mandíbula de aço Hadfield analisada após serviço (TANAKA 2011).....	53
Figura 31 - Perfil de microdureza do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo.	54
Figura 32 – Marcas de endentações para medição de microdureza da superfície desgastada do aço Hadfield utilizando tamanho de abrasivo de #16 (1,20 – 2,40 mm) com aumento de 500 x.	55
Figura 33 – Microdureza da superfície desgastada do aço H-13 em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5.....	55
Figura 34 – Microdureza da superfície desgastada do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5.....	56
Figura 35 – Comparação entre as microdureza das superfícies desgastadas do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH inicial 5,5.....	57
Figura 36 – Comparação entre as microdurezas das superfícies desgastadas do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5 e pH 12,8.	58
Figura 37 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o pH inicial de 5,5 e tamanho de abrasivo de: (a) #100 (0,15 – 0,30 mm) ; (b) #50 (0,30 - 0,60 mm) e (c) #50 (0,30 - 0,60 mm) com ampliações do eventos “a” e “1”	61

Figura 38 – MEV da superfície desgastada do aço H-13 em ensaios com pH de 5,5 e o tamanho de abrasivo de: (a) e (b) #100 (0,15 - 0,30 mm); (c) #50 (0,30 – 0,60 mm).	62
Figura 39 – MEV da superfície desgastada em ensaios com o tamanho de abrasivo de #30 (0,60 – 1,20 mm) e pH do meio de 5,5 , para o aço: (a) Hadfield com ampliação do evento tipo “g” ; (b) Hadfield – Pontos do EDS ; (c) Hadfield - EDS ponto 1 ; (d) Hadfield - EDS ponto 2 ; (e) H-13 e (f) H-13 com ampliação do evento tipo “g”.65	65
Figura 40 – Cavacos da superfície desgastada do aço H-13 com pH 5,5 e tamanho de abrasivo de: (a) #50 (0,30 – 0,60 mm); (b) #30 (0,60 – 1,20 mm) e (c) #16 (1,20 – 2,40 mm).	67
Figura 41 – Cavacos da superfície desgastada do aço Hadfield com o tamanho de abrasivo de : (a) #100 (0,15 – 0,30 mm) ; (b) #16 (1,20 – 2,40 mm).	69
Figura 42 – Sz em função do tamanho do abrasivo para o aço H-13 e aço Hadfield para ensaios realizados com pH 5,5.....	71
Figura 43 - Sz em função do pH da solução para os ensaios realizados com aço Hadfield e tamanho do abrasivo #100 (0,15 – 0,30 mm).....	71
Figura 44 - Variação do pH ao término do ensaio em função do tamanho do abrasivo para os ensaios realizados com aço H-13 e aço Hadfield.	74
Figura 45 - Variação do pH final em função do tamanho do abrasivo para ensaios no equipamento roda de borracha sem corpo de prova. Algumas barras de erros não estão visíveis devido ao pequeno desvio padrão.	75
Figura 46 - Variação do pH em função do tamanho do abrasivo para ensaios em recipiente de vidro. Algumas barras de erros não estão visíveis devido ao pequeno desvio padrão.	76
Figura 47 - Comportamento do pH em função do tempo para ensaios em roda de borracha sem corpo de prova: (a) pH inicial de 5,50 ; (b) pH inicial 7,0 ; (c) pH inicial de 12,8.....	77
Figura 48 - Perda de massa em função do tamanho do abrasivo e do pH inicial para ensaios com duração de 1 minuto: (a) aço H-13; (b) aço Hadfield.	79
Figura 49 - Perda de massa para ensaios realizados com pH inicial de 5,5, 7,0 e para pH 7,0 obtido por meio da estabilização do pH 5,5.....	80

Figura 50 – Perda de massa do aço H-13 em função do tempo de ensaio para pH inicial de 5,5 e para o tamanhos de abrasivo: (a) #50 (0,30 a 0,60 mm) ; (b) #16 (1,20 a 2,40 mm).	82
Figura 51 – Perda de massa do aço Hadfield em função do tempo de ensaio para pH inicial de 5,5 e para o tamanhos de abrasivo: (a) #50 (0,30 a 0,60 mm) ; (b) #16 (1,20 a 2,40 mm)	83
Figura 52 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5 obtido com água deionizada e com solução tampão na segunda série de ensaios.	85
Figura 53 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5 obtido com água deionizada e com solução tampão.....	87
Figura 54 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5 obtido com água deionizada.....	88
Figura 55 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com solução tampão com pH 5,5.....	89
Figura 56 – Comparação de resultados obtidos para o aço Hadfield de perda de massa obtidas por meio de cálculos utilizando material de referência e obtida por ensaio utilizando água deionizada com pH 5,5 e tamanho de abrasivo de #100 e #16.	90
Figura 57 – MEV da superfície de desgaste do aço Hadfield em ensaios realizados com solução tampão com pH 5,5 , em destaque pontos de corrosão, com tamanho de abrasivo: (a) #50 (0,30 – 0,60 mm) ; (b) e (c) #16 (1,20 – 2,40 mm).....	91
Figura 58 – Perda de massa do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para as duas séries de ensaios, com a perda de massa para o pH 5,5 tampão sendo ajustada.	92
Figura 59 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o tamanho de abrasivo de #100 (0,15 – 0,30 mm) e pH do meio de 5,5, com aumento de: (a) 100 x e (b) 400 x.....	108

Figura 60 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o tamanho de abrasivo de #100 (0,15 – 0,30 mm) e pH do meio de 12,8 , com aumento de: (a) 100 x ; (b) 500 x ; (c) 1000 x.....	110
Figura 61 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o tamanho de abrasivo de #50 (0,30 – 0,60 mm) e pH do meio de 5,5 , com aumento de: (a) 100 x ; (b) 250 x ; (c) 500 x.....	111
Figura 62 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o tamanho de abrasivo de #50 (0,30 – 0,60 mm) e pH do meio de 12,8 , com aumento de: (a) 100 x ; (b) 500 x ; (c) 1000 x.....	113
Figura 63 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o tamanho de abrasivo de #30 (0,60 – 1,20 mm) e pH do meio de 5,5 , com aumento de: (a) 100 x ; (b) 250 x	114
Figura 64 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o tamanho de abrasivo de #16 (1,20 – 2,40 mm) e pH do meio de 5,5 , com aumento de: (a) 100 x ; (b) 250 x ; (c) 1000 x.....	116
Figura 65 – Cavacos da superfície desgastada do aço H-13 durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #100 (0,15 – 0,30 mm) e pH de 5,5 com aumento de: (a) 200 x ; (b) 1000 x ; (c) EDS ponto 1.	117
Figura 66 – Cavacos da superfície desgastada do aço H-13 durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #50 (0,30 – 0,60 mm) e pH de 5,5 com aumento de: (a) 50 x ; (b) 200 x ; (c) 1000 x.	119
Figura 67 – Cavacos da superfície desgastada do aço H-13 durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #30 (0,60 – 1,20 mm) e pH de 5,5 com aumento de: (a) 100 x ; (b) 400 x ; (c) 190 x ; (d) EDS do ponto 1.	121
Figura 68 – Cavacos da superfície desgastada do aço H-13 durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #16 (1,20 – 2,40 mm) e pH de 5,5 com aumento de: (a) 30 x ; (b) 100 x ; (c) 400 x ; (d) EDS do ponto 1.....	123
Figura 69 – Cavacos da superfície desgastada do aço Hadfield durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #100 (0,15 – 0,30 mm) e pH de 5,5 com aumento de: (a) 200 x ; (b) 1000 x ; (c) EDS do ponto 2.	124

Figura 70 – Cavacos da superfície desgastada do aço Hadfield durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #50 (0,30 – 0,60 mm) e pH de 5,5 com aumento de:

(a) 200 x ; (b) EDS do ponto 1 ; (c) 500 x 125

Figura 71 – Cavacos da superfície desgastada do aço Hadfield durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #30 (0,60 – 1,20 mm) e pH de 5,5 com aumento de:

(a) 200 x ; (b) EDS do ponto 1 ; (c) 500 x 127

Figura 72 – Cavacos da superfície desgastada do aço Hadfield durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #16 (1,20 – 2,40 mm) e pH de 5,5 com aumento de:

(a) 100 x ; (b) EDS do ponto 1 ; (c) EDS do ponto 1 128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Justificativas para o TCA.....	19
Tabela 2 - Taxa de desgaste em função da variação do pH do concentrado de: (a) 1,8 % de sílica; (b) 6 % de sílica (ROVERI e CHAVES 2011).	23
Tabela 3 – Composição química dos materiais (% massa).....	31
Tabela 4 – Macro e micro dureza dos aços H-13 e Hadfield.....	38
Tabela 5 – Caracterização dos abrasivos utilizando equipamento CAMSIZER	41
Tabela 6 – Máxima profundidade da marca de desgaste em relação a superfície retificada, média de 3 medições.....	50
Tabela 7 – Tamanho e forma após ensaios com aço Hadfield utilizando abrasivo de tamanho #100 (0,15 – 0,30 mm) em função valor do pH da solução.	72
Tabela 8 – Análise química por espectrometria de plasma das soluções aquosas após ensaios com aço Hadfield para o menor tamanho de abrasivo em função do pH inicial da solução.....	73
Tabela 9 – Perda de massa do aço H-13 e diferença percentual para cada tamanho de abrasivo em função da variação da solução utilizada.	86
Tabela 10 - Perda de massa do aço Hadfield e diferença percentual para cada tamanho de abrasivo em função da variação da solução utilizada.	87
Tabela 11 – Perda de massa e pH para os ensaios com aço H-13.	104
Tabela 12 – Perda de massa e pH final para os ensaios com aço Hadfield da primeira série de ensaios.	105
Tabela 13 – Perda de massa do aço H-13 e pH final da segunda série de ensaios para o pH 5,5 obtido com água deionizada e com solução tampão.	106
Tabela 14 – Perda de massa do aço Hadfield para segunda série de ensaios, sendo que a perda de massa utilizando pH 5,5 com água deionizada trata-se da perda de massa relativa.....	107

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AISI: American Iron and Steel Institute

ASTM: American Society for Testing and Materials

CCC: Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado

CFC: Estrutura cristalina cúbica de face centrada

CQuiM - Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas

CNPQ: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

INES: Instituto Nacional de Engenharia de Superfície

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

LFS: Laboratório de Fenômenos de Superfície

TCA: Tamanho crítico do abrasivo

USP: Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

#: Mesh

b/l: relação de aspecto, correspondente à relação entre a menor dimensão (b) e a maior dimensão (l)

HRC: Dureza Rockwell escala C

HV0,3: Dureza Vickers convencional determinada com 2,94 N [MPa]

HV30: Dureza Vickers convencional determinada com 294 N [MPa]

SPHT: Fator de esfericidade, sendo obtido da relação entre área da partícula e seu perímetro

Sz: Parâmetro de rugosidade que expressa valor médio da altura absoluta dos cinco picos mais altos e a profundidade dos cinco vales mais profundos [μm]

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão bibliográfica	2
2.1. Desgaste abrasivo	3
2.2. Mecanismos de desgaste abrasivo	4
2.3. Aspectos relevantes da abrasão	5
2.3.1. Tamanho do abrasivo	5
2.3.2. Efeito do meio aquoso	20
2.3.3. Efeito da microestrutura	24
2.4. O aço Hadfield	28
3. Objetivos da Dissertação	30
4. Materiais e Métodos	30
4.1. Corpos de prova	31
4.2. Preparação metalográfica e caracterização da superfície de desgaste	32
4.3. Dureza	32
4.4. Ensaios de desgaste	33
4.5. Abrasivos	34
4.6. Soluções aquosas	35
4.7. Perfilometria	36
5. Resultados	37
5.1. Caracterização dos materiais e do abrasivo	37
5.1.1. Microestrutura	37
5.1.2. Dureza antes dos ensaios de desgaste	38
5.1.3. Abrasivo	39
5.2. Primeira série de ensaios de desgaste	42
5.2.1. Ensaios de desgaste	42
5.2.2. Microdureza após o ensaio	49
5.2.3. Superfícies de desgaste	59
5.2.4. Partículas de desgaste	66
5.2.5. Perfilometria	70
5.2.6. Caracterização do abrasivo após ensaio	72

5.2.7. Análise química da solução aquosa	72
5.2.8. Comportamento do pH do meio	73
5.2.9. Ensaio ao longo do tempo	81
5.3. Segunda série de ensaios – Ensaio com solução tampão – pH 5,5	84
6. Conclusões	94
7. Sugestões para trabalhos futuros	96
8. Referências bibliográficas	98
Anexo A - Resultados dos ensaios de desgaste: Perda de massa e pH final.....	104
Anexo B - Mecanismo de desgaste.....	108
Anexo C - Partículas de desgaste.....	116

1. Introdução

O desgaste abrasivo é considerado um dos mais importantes geradores de falhas e perdas de componentes mecânicos nas indústrias de mineração, siderurgia, agricultura, usinas de álcool, entre outras. Segundo Eyre (1991), 50% das falhas de componentes de máquinas são provocados pelo desgaste. Em valores, estima-se que os custos com reparos causados pelo desgaste abrasivo variam de 1 a 4 % do produto interno bruto de uma nação industrializada (TYLCZAK 1992).

Aos elevados custos para substituição e reparos de componentes de máquinas, somam-se os custos devido às paradas para reposição dos componentes danificados, eles se constituem em contínua motivação para os estudos tecnológicos dos materiais resistentes ao desgaste.

Componentes projetados para uso em operações de sacrifício devem possuir, antes de tudo, resistência à abrasão adequada, mas, também, devem ter a capacidade de resistir ao impacto e ao ataque químico (DIESBURG e BORIK 1974).

A resistência ao desgaste abrasivo não é uma propriedade intrínseca dos materiais, dependendo do sistema (carga aplicada, tipo de movimento, a temperatura e o meio), das condições de operação (área de contato, condições da superfície do componente e regime de lubrificação), do tipo do abrasivo (dureza, geometria, tamanho e ductilidade) e do material (composição da liga, microestrutura, endurecimento superficial e revestimento) (ZUM GAHR 1987).

Conhecer as respostas dos materiais às solicitações de desgaste propiciadas por diferentes tribossistemas é de grande importância para a seleção de materiais para determinada aplicação. Um exemplo representativo na indústria de mineração é o da variação do pH em minas localizadas em diferentes regiões que apresentam diferentes valores de pH da água utilizada nos equipamentos de mineração. Segundo Roveri e Chaves (2011), toda polpa mineral possui íons em solução que podem adicionar um componente corrosivo, apresentando ação sinérgica com o componente abrasivo. Assim, esses fatores combinados apresentam taxa de desgaste maior do que quando somadas as taxas separadas de abrasão e corrosão.

A seleção de materiais resistentes ao desgaste abrasivo pode ser resumida como a maximização da dureza sem prejuízos à tenacidade à fratura (PINTAÚDE 2002). A exigência de elevada resistência à abrasão em combinação com boa tenacidade em geral é bastante restritiva. Pode ser demonstrado, com exemplos simples, que o material altamente resistente à abrasão é duro, porém frágil. Existe, no entanto, uma exceção notável: o aço manganês austenítico, que combina uma excelente resistência à abrasão “*gouging*”, mantendo uma tenacidade fenomenal (DIESBURG e BORIK 1974).

O aço manganês austenítico, ou aço Hadfield, é bastante utilizado na fabricação de peças submetidas à abrasão e ao impacto, por possuir propriedades de endurecimento superficial propiciado pelo trabalho e elevada tenacidade. O aço Hadfield tem extensa aplicação em mineração e conhecer o seu comportamento em condições de abrasão pode contribuir para a redução de perdas e falhas de componentes, bem como ganhos produtivos.

Neste trabalho, estuda-se o desgaste abrasivo de aço Hadfield empregado em britadores de minério em diversos valores de pH. Esse estudo foi realizado em função do tamanho do abrasivo, para explorar eventuais interações sinérgicas entre as duas variáveis. Para comparação, o efeito das mesmas variáveis foram quantificadas em função de um material de referência, um aço martensítico, o aço H-13.

2. Revisão bibliográfica

A seguir, será apresentada uma revisão bibliográfica sobre desgaste abrasivo, suas classificações e sobre os mecanismos de desgaste. Posteriormente são apresentados os trabalhos mais relevantes a respeito do efeito do tamanho do abrasivo, do efeito do meio aquoso perante a abrasão e da influência da microestrutura dos materiais na resistência ao desgaste. E por fim, um breve contexto histórico sobre o aço Hadfield, bem como trabalhos relacionando este aço ao desgaste abrasivo.

2.1. Desgaste abrasivo

A abrasão é o desgaste causado pelo deslocamento de material de superfícies em movimento relativo, devido à presença de protuberâncias duras ou devido à presença de partículas duras, soltas entre as superfícies ou fixas a uma delas. Características desse fenômeno é a elevada deformação plástica e, dependendo da microestrutura do material tensionado, a ocorrência de trincas. As partículas de desgastes são formadas por cisalhamento nos materiais dúcteis ou formação e propagação de trincas nos materiais frágeis (ZUM GAHR 1981).

A classificação do desgaste abrasivo visa apoiar a seleção de materiais ou o entendimento dos fenômenos envolvidos no desgaste. No primeiro grupo de classificações, o que considera os esforços sobre os abrasivos, tem-se a classificação de Avery (1977) que descreve três formas de abrasão: o desgaste abrasivo sob altos esforços (no qual o abrasivo é quebrado, como na moagem); o desgaste abrasivo sob baixos esforços (no qual o abrasivo não é quebrado, como na escavação), e; o designado por “*gouging abrasion*” em inglês, situação na qual o abrasivo de grandes dimensões, da ordem de metros é fraturado como o que ocorre nos britadores.

Gates (1998) classifica a abrasão segundo a intensidade do desgaste, em moderado, severo e extremo, sendo que para esta primeira classificação os abrasivos são pequenos e predominantemente arredondados e a tensão de contato é insuficiente para fraturá-lo, tendo como principal mecanismo de desgaste o microsulcamento. Para a intensidade do desgaste severo, o abrasivos apresentam tamanho médio e com forma pontiaguda e a tensão de contato é suficiente para fraturá-los, predominando o mecanismo de desgaste de microcorte. Para a intensidade de desgaste extremo, os abrasivos apresentam grandes dimensões com forma pontiaguda e a tensão de contato pode resultar em deformações macroscópicas e fratura frágil do material desgastado.

A classificação de abrasão devido a Burwell (1958) a qual o desgaste abrasivo é a dois corpos quando o abrasivo está fixo em um dos corpos e desgaste abrasivo a três corpos quando o abrasivo está solto entre os corpos em movimento relativo. Posteriormente, de acordo com Trezona e co-autores (1999), a cinemática da partícula é que determina a classificação, sendo que o desgaste abrasivo ocorre por

deslizamento quando o abrasivo risca continuamente o corpo ou por rolamento quando a cinemática da partícula abrasiva é essencialmente rolamento.

Este trabalho trata, por hipótese, do desgaste abrasivo sob baixos esforços, segundo a classificação de Avery (1977) ou do desgaste a três corpos segundo Burwell (1958) ou do desgaste moderado segundo Gates (1998) ou por rolamento de partícula segundo Trezona e co-autores (1999). No texto que se segue será adotada a nomenclatura de abrasão a três corpos por explicitar convenientemente o arranjo do sistema tribológico.

2.2. Mecanismos de desgaste abrasivo

No desgaste abrasivo, diferentes mecanismos são responsáveis por remover ou deslocar material de uma superfície. Hutchings (1992) divide os mecanismos em dois grupos: mecanismos de abrasão por deformação plástica e mecanismos de abrasão por fratura frágil. Entre os mecanismos controlados pela deformação plástica, estão o microsulcamento e o microcorte. O mecanismo controlado pela fratura frágil é denominado por mecanismo de microtrincamento.

O mecanismo de microsulcamento é caracterizado por formação de uma proa a frente da partícula abrasiva e com material sendo continuamente deslocado para a lateral do sulco criado. Ainda, durante o microsulcamento, pode ocorrer perda de material, devido à ação simultânea ou sucessiva das partículas abrasivas, em que o material é deformado plasticamente várias vezes, ou seja, sucessivas ocorrências de microsulcamento, fraturando o material por um processo de fadiga de baixo ciclo, denominado por microfadiga (ZUM GAHR 1987).

O mecanismo de microcorte refere-se à remoção de material na forma de pequenos cavacos, *debris*, devido à tensão cisalhante imposta pelo abrasivo, assim como ocorre nos processos de usinagem.

Por fim, o mecanismo de microtrincamento ocorre devido a existência de altas tensões concentradas, impostas pelas partículas abrasivas, especialmente na superfície dos materiais frágeis (ZUM GAHR 1987). O mecanismo é caracterizado pela

formação e propagação de trincas.

Na Figura 1 é apresentado um esquema ilustrativo dos mecanismos de desgastes citados.

Figura 1 - Mecanismos de desgaste abrasivo (adaptado de ZUM GAHR 1987).

2.3. Aspectos relevantes da abrasão

A intensidade do desgaste abrasivo depende de variáveis do sistema, do abrasivo e do meio. Dentre estes fatores, a dissertação se concentrará no efeito do tamanho do abrasivo, no efeito do pH do meio e no efeito da microestrutura do material (austenita e martensita). Em outros trabalhos (PINTAÚDE 2002; VILLABÓN 2005; CORONADO 2010; TOZETTI *et al.* 2013), foram revisados e estudados aspectos da abrasão não revisados nesse trabalho.

2.3.1. Tamanho do abrasivo

Avient et al. (1960) realizaram ensaios de abrasão a dois corpos no sistema pino

contra lixa para alguns metais puros variando o tamanho do abrasivo. Os resultados são apresentados na Figura 2, em que a taxa de desgaste evolui de forma positiva com o aumento do tamanho do abrasivo até o valor de 70 μm . Após este tamanho de abrasivo a taxa de desgaste passa a ser independente do tamanho do abrasivo. Os autores observaram que o tamanho crítico do abrasivo (TCA) é controlado pelo entupimento (“*clogging*” em inglês) dos espaços livres entre os abrasivos menores por partículas de desgaste, distribuindo a carga aplicada entre os abrasivos e as partículas de desgaste.

Figura 2 – Variação da taxa de desgaste em função do tamanho do abrasivo para ensaios de abrasão a dois corpos (adaptado de AVIENT *et al.* 1960).

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos por Rabinowicz *et al.* (1961), em que foram realizados ensaios de desgaste abrasivo a três corpos em bronze e aço. Os autores descreveram que a taxa de desgaste cresceu com o aumento do tamanho do abrasivo de alumina, com valores de TCA aproximadamente 50 μm para o aço e de 80 μm para o bronze. Para tamanhos de grãos abrasivos maiores, a taxa de desgaste permaneceu independente do tamanho do abrasivo, ou seja, o tamanho crítico do abrasivo variou de acordo com o material avaliado.

Figura 3 - Relação entre as taxas de desgaste e o tamanho do abrasivo em ensaios de abrasão a três corpos (Adaptado de RABINOWICZ *et al.* 1961).

Sin *et al.* (1979) realizaram ensaios de abrasão a dois corpos, na configuração pino contra lixa, variando o tamanho do abrasivo e a carga aplicada, em níquel puro e aço AISI 1095. Os ensaios foram realizados seguindo trajetória espiral para que o material sempre entre em contato com abrasivo íntegro. Os resultados são apresentados na Figura 4, onde para os dois materiais a taxa de desgaste aumenta até um TCA de aproximadamente 80 μm . Segundo os autores o efeito do tamanho do abrasivo ocorre devido à mudança do mecanismo de desgaste predominante, alterando-se de microsulcamento para microcorte, devido aos abrasivos menores, com tamanho menor do que o TCA, apresentarem pontas arredondadas e os abrasivos maiores serem pontiagudos.

Figura 4 – Taxa de desgaste em ensaios de abrasão a dois corpos em função do tamanho do abrasivo utilizando diferentes cargas aplicadas para: a) Níquel , b) Aço AISI 1095 (Adaptado de SIN *et al.* 1979).

A justificativa de Avient *et al.* (1960) para o efeito do tamanho do abrasivo foi questionada mediante a um experimento idealizado por Sin *et al.* (1979), onde os ensaios foram realizados seguindo trajetória espiral de modo a garantir que sempre terá um abrasivo íntegro para interagir com o material em ensaio, não ocorrendo o fenômeno de entupimento.

Miller (1980) estudou o efeito do tamanho do abrasivo utilizando abrasivos pequenos (1 µm a 60 µm), submetendo esferas fabricadas com liga de molibdênio a ensaios de abrasão a três corpos, com abrasivo solto, utilizando o equipamento de lapidação de esferas e pasta de diamante em diferentes granulometrias como abrasivo. Os resultados são mostrados na Figura 5, em que, com exceção dos ensaios realizados com a menor carga aplicada, tem-se um aumento linear da taxa de desgaste com o aumento do tamanho do abrasivo até o tamanho crítico de 45 µm. A partir do TCA, a taxa continuou a aumentar com a variação do tamanho do abrasivo, mas com uma intensidade menor. O TCA foi justificado com a ocorrência de fratura dos abrasivos maiores, uma vez que não foram encontradas evidências de quebras para os abrasivos menores.

Figura 5 – Taxa de desgaste de amostras de Molibdênio em função do tamanho do abrasivo para diferentes cargas aplicada em ensaios de abrasão a três corpos (adaptado de Miller 1980).

Misra e Finnie (1981) estudaram o efeito do tamanho do abrasivo na abrasão a dois corpos para o alumínio utilizando duas velocidades de deslizamento. Os resultados são mostrados na Figura 6. Os autores verificaram que a taxa de desgaste aumenta com aumento do tamanho do abrasivo até aproximadamente $100 \mu\text{m}$, e para partículas maiores a taxa de desgaste continua a aumentar, porém com menor variação de intensidade em função do aumento do tamanho do abrasivo.

Figura 6 – Taxa de desgaste em função do tamanho do abrasivo para velocidades de deslizamento de 200 mm/s e 0,2 mm/s em ensaios de abrasão a dois corpos (Adaptado de MISRA e FINNIE 1981).

Misra e Finnie (1981) também realizaram ensaios de abrasão a dois corpos, a três corpos e de erosão em cobre, variando o tamanho do abrasivo. Os resultados são apresentados na Figura 7, onde os autores verificaram, assim como nos ensaios com alumínio, que o TCA encontrado foi de aproximadamente 100 μm .

Figura 7 – Taxa de desgaste em função do tamanho do abrasivo para abrasão a dois corpos, três corpos e erosão (Adaptado de MISRA e FINNIE 1981).

Para os resultados de Misra e Finnie (1981) apresentados na Figura 6 e na Figura 7 os autores sugerem duas possíveis explicações para o fenômeno. A primeira trata-se da hipótese de que uma camada mais próxima à superfície, com profundidade de 50 a 100 μm , endurece mais do que o restante do material, sendo que quando partículas menores desgastam a superfície, elas apenas desgastam esta camada dura, encontrando apenas material com a dureza maior, ao contrário das partículas maiores que conseguem penetrar a camada dura por completo e desgastar material com dureza menor. Ainda segundo os autores a influência da camada dura após o tamanho crítico do abrasivo é reduzida, não ocorrendo aumento significativo na taxa de desgaste em função do tamanho do abrasivo.

A segunda explicação para o fenômeno do TCA dada por Misra e Finnie (1981) é de que a deformação causada por abrasivos menores apresentam menor volume de deformação, quando comparada à deformação causada por abrasivos maiores, isso resulta em maiores dificuldades para a movimentação de discordâncias, sendo

explicado pelo fato da tensão de escoamento de um pequeno volume ser superior do que de um volume maior.

Como Misra e Finnie (1981) ensaiaram apenas um tamanho de abrasivo expressivamente maior do que o TCA, não é possível eliminar a hipótese de que abrasivos ainda maiores podem atingir uma maior profundidade e remover mais material com dureza menor aumentando a variação da taxa de desgaste em função do tamanho do abrasivo.

O resultados apresentados por Rabinowicz *et al.* (1961) e por Misra e Finnie (1981) não corroboram com a justificativa de Avient *et al.* (1960) para o efeito do tamanho do abrasivo, pois o autores realizaram ensaios de abrasão a três corpos, onde não ocorre o fenômeno de entupimento.

Mondal *et al.* (1998) observaram o efeito do tamanho do abrasivo no desgaste de ligas de alumínio realizando ensaios de abrasão a dois corpos, nos quais a profundidade de penetração do abrasivo aumentou com o aumento do tamanho do abrasivo, resultando em aumento da taxa de desgaste. Os autores ensaiaram apenas três tamanhos de abrasivo, o que não permite afirmar a existência ou ausência de um TCA.

Wirojanupatump e Shipway (2000) estudaram o efeito do tamanho do abrasivo em conjunto com o efeito do meio, aquoso ou a seco, submetendo amostras de aço carbono, com dureza de 225 HV, a ensaios de abrasão a três corpos na configuração roda de borracha, utilizando areia como abrasivo. Os resultados são apresentados na Figura 8. Os autores constataram que, para os ensaios a seco, o coeficiente de desgaste diminuiu com o aumento do tamanho do abrasivo e para os ensaios em presença de água o coeficiente de desgaste foi desprezível. Segundo os autores, os resultados a seco são explicados considerando o formato dos abrasivos. Os abrasivos maiores apresentaram pontas arredondadas, causando endentações múltiplas, características da abrasão a três corpos, enquanto os menores eram pontiagudos, causando microcorte, característico da abrasão a dois corpos. Já para os ensaios realizados a úmido, a água teria sido responsável por lubrificar a superfície de desgaste das amostras, onde os autores não observaram a ocorrência de microcorte, microsulcamento ou endentações. Os resultados a seco sugerem que para o

mecanismo de desgaste via endentações múltiplas o tamanho do abrasivo não exerce influência sobre a taxa de desgaste para a situação estudada pelos autores, tendo em vista que a taxa de desgaste não variou para os dois maiores tamanhos de abrasivo.

Figura 8 – Coeficiente de desgaste em função do tamanho do abrasivo para meios úmido e seco em ensaios de abrasão a três corpos (adaptado de WIROJANUPATUMP e SHIPWAY 2000).

Wirojanupatump e Shipway (2000) realizaram ensaios com apenas três tamanhos de abrasivo o que não permite concluir qual o TCA, apenas sendo possível estimar que o TCA é controlado pela mudança do mecanismo de desgaste, com o formato da curva sendo diferenciada em relação às curvas dos trabalhos apresentados anteriormente, sendo que a taxa de desgaste inicialmente diminui com aumento do tamanho do abrasivo e após o possível TCA passa a ser independente do tamanho do abrasivo.

Das e colaboradores (2008) submeteram corpos de prova fabricados com ligas de alumínio a ensaios de abrasão a dois corpos, variando o tamanho do abrasivo. Os resultados obtidos pelos autores são apresentados na Figura 9, em que a taxa de desgaste não varia para um mesmo material quando o tamanho do abrasivo é menor do que 60 μm. No entanto, a taxa de desgaste aumenta rapidamente quando o abrasivo tem tamanho superior a 60 μm. Segundo os autores, a tensão efetiva por unidade de

abrasivo é maior para abrasivos maiores, pois a carga aplicada é dividida por um número menor de abrasivos. Quando o abrasivo é pequeno (menor que 60 μm), ocorre apenas contato elástico, devido à tensão efetiva por abrasivo ser menor, com os abrasivos apenas suportando a carga aplicada. Para abrasivos maiores, a superfície e a sub-superfície sofrem maiores deformações plásticas devido ao aumento da profundidade de penetrações dos abrasivos, observado pelos autores analisando a seção transversal dos corpos de prova, o que representa a presença do mecanismo de microsulcamento.

Figura 9 – Taxa de desgaste em função do tamanho do abrasivo para ligas de alumínio submetidas a ensaios de abrasão a dois corpos (adaptado de DAS *et al.* 2008).

Chacon-Nava *et al.* (2010) realizaram ensaios de abrasão a três corpos na configuração roda de borracha, com os resultados de perda volumétrica em função do tamanho do abrasivo para diversos aços com composições químicas diferentes, apresentados na Figura 10. Os autores mostraram que a perda de massa aumentou quando o tamanho do abrasivo passou de 50 μm para 125 μm . Com o aumento do tamanho do abrasivo para 250 μm a perda de massa diminuiu atingindo seu menor valor para cada um dos materiais com abrasivo de 560 μm . Os autores justificaram a redução da perda de massa após o TCA devido à alteração de forma do abrasivo, antes do ensaio, com a sua variação de tamanho, em que os abrasivos maiores que o TCA

apresentara forma arredondada e o abrasivos menores eram pontiagudos.

Figura 10 – Perda volumétrica em função do tamanho do abrasivo para diversos aços submetidos a ensaios em roda de borracha (Adaptado de Chacon-Nava *et al.* 2010)

Coronado e Sinatora (2011a) submeteram amostras de ferro fundido branco, com matriz austenítica e segunda fase dura, a ensaios de abrasão a dois corpos na configuração pino contra lixa, seguindo trajetória espiral e variando o tamanho do abrasivo, a fim de verificar a existência do TCA em materiais com segunda fase dura. Os autores encontraram que a perda de massa aumenta linearmente com o aumento do tamanho do abrasivo, até um valor crítico de 36 µm. Após o TCA, a perda de massa continua a aumentar, porém com uma variação menor em função do aumento do tamanho da partícula abrasiva. Os resultados são apresentados na Figura 11.

Figura 11 – Perda de massa após ensaio de abrasão a dois corpos em função do tamanho de abrasivo para diferentes distâncias percorridas (CORONADO e SINATORA 2011a).

Coronado e Sinatora (2011a) também mostraram que com o aumento do tamanho do abrasivo, a largura dos sulcos aumenta numa relação aproximadamente linear, diferente do ocorrido com a perda de massa, para a qual existem duas regiões, sendo separadas pelo TCA. Os autores atribuíram o efeito do tamanho do abrasivo à mudança do mecanismo de desgaste, sendo que para abrasivos menores o mecanismo de desgaste predominante foi o microcorte e após o TCA, para abrasivos maiores, o mecanismo predominante passou a ser o microsulcamento. Associado à mudança de mecanismo de desgaste, os autores ainda mostraram que ocorre mudança do mecanismo de remoção de material, sendo que para abrasivos menores os cavacos são contínuos, em forma de espiral causado pela ação de corte, por outro lado, para abrasivos maiores os cavacos são descontínuos, como mostrado na Figura 12.

(a)

(b)

Figura 12 – MEV da lixa evidenciando as partículas de desgaste após ensaio de abrasão a dois corpos para tamanhos de abrasivo de (a) 23,6 µm e (b) 116,0 µm (CORONADO e SINATORA 2011a).

Abrasivos pequenos apresentam pontas agudas, causando pouca penetração no material, produzindo cavacos contínuos, devido à deformação plástica por cisalhamento. Já os abrasivos maiores com pontas arredondadas penetram mais e produzem altas tensões de compressão, que induz a formação de microtrincas nos cavacos (CORONADO e SINATORA 2011a). A variação do formato dos abrasivos com o aumento do tamanho encontrado pelos autores se difere do encontrado por Sin *et al.* (1979), ou seja, os abrasivos maiores do que o TCA utilizados por Sin *et al.* (1979) eram pontiagudos. Mas por outro lado, o mecanismo de desgaste em

função do formato do abrasivo foi o mesmo em ambos os trabalhos. Os autores ainda associaram os resultados obtidos de perfilometria com a taxa de desgaste, sendo que quanto maior a profundidade de penetração (parâmetro Sz) do abrasivo maior a taxa de desgaste, assim como mostrado por Das e colaboradores (2008) e por Modal *et al.* (1998).

Tozetti *et al.* (2013) estudaram o efeito do tamanho do abrasivo no desgaste do ferro fundido branco, realizando ensaios de abrasão a três corpos no abrasômetro roda de borracha, variando a granulometria do abrasivo e a carga aplicada. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 13, em que o volume perdido aumentou com aumento do tamanho do abrasivo até 115 μm para todas as cargas aplicadas. Após este tamanho de abrasivo o volume perdido passou a ser independente do tamanho do abrasivo, com exceção para os resultados utilizando a maior carga aplicada, de 130 N, para os quais a perda de massa continuou a aumentar, mas com inclinação maior.

Figura 13 – Volume perdido em função do tamanho do abrasivo para diferentes cargas aplicadas em ensaios de abrasão a três corpos (TOZETTI *et al.* 2013).

Segundo Tozzeti *et al.* (2013), o tamanho crítico do abrasivo encontrado para as três cargas foi de 107 μm , não ficando claro no trabalho as razões para essa escolha tendo em vista que este tamanho de abrasivo não foi ensaiado. Destaca-se no trabalho que o comportamento para tamanhos de abrasivo maiores que um determinado tamanho depende da força aplicada.

Coronado e Sinatora (2011a) sintetizaram os comportamentos descritos na

literatura para o efeito do tamanho do abrasivo na taxa de desgaste. Foi proposto que para abrasivos pequenos, a taxa de desgaste aumenta linearmente com o aumento do tamanho do abrasivo, até alcançar um tamanho crítico do abrasivo (TCA). Após o TCA o comportamento é variado: a taxa de desgaste continua a aumentar com uma menor inclinação (curva 1), ou não sofre alterações com a variação do tamanho do abrasivo (curva 2), ou diminui (curva 3). Esse comportamento é esquematizado na Figura 14.

Figura 14 - Representação esquemática do efeito do tamanho do abrasivo na taxa de desgaste (adaptado de CORONADO e SINATORA 2011a).

A revisão bibliográfica apresentada neste trabalho sobre o efeito do tamanho do abrasivo permite sintetizar na Tabela 1 as justificativas encontradas para o fenômeno.

Tabela 1 – Justificativas para o TCA. Na coluna Classificação/[Comportamento] é identificado o comportamento da perda de massa após p TCA, sendo que: [A]: Aumenta com intensidade menor; [C]: Permanece constante e [D]: Diminui.

Referência	Classificação [Comportamento]	Justificativa para o TCA
Avient <i>et al.</i> (1960)	2 corpos [C]	Entupimento dos abrasivos menores (antes do TCA) com partículas de desgaste (“clogging”).
Sin <i>et al.</i> (1979)	2 corpos [C]	Mudança do micromecanismo de desgaste devido a variação de forma do abrasivo. Abrasivos menores com pontas arredondadas causaram microsulcamento e os abrasivos maiores com pontas agudas causaram microcorte.
Miller (1980)	3 corpos [A]	Fratura dos abrasivos após o TCA.
Misra e Finnie (1981)	2 e 3 corpos [C]	1 - Abrasivos menores que o TCA não conseguem penetrar completamente a camada dura próxima a superfície, sendo a influência desta camada reduzida com aumento do tamanho do abrasivo.
		2- Abrasivos menores que o TCA causam menor volume de deformação, resultando em maior dificuldade para movimentação de discordâncias, devido ao limite de escoamento em um pequeno volume ser superior a de volumes maiores.
Wirojanupatump e Shipway (2000)	3 corpos [D]	Mudança do micromecanismo de desgaste devido a variação de forma dos abrasivos, sendo que abrasivos menores pontiagudos causaram microcorte e abrasivos maiores com pontas arredondadas causaram microsulcamento.
Das e colaboradores (2008)	2 corpos [A]	Tensão efetiva por unidade de abrasivo é menor para abrasivos menores ocorrendo apenas contato elástico antes do TCA. Abrasivos maiores causam deformação plástica em função da maior tensão efetiva por abrasivo.
Chacon-Nava <i>et al.</i> (2010)	3 corpos [D]	Fratura dos abrasivos após o TCA
Coronado e Sinatora (2011a)	2 corpos [A]	Mudança do micromecanismo de desgaste devido a variação de forma dos abrasivos, sendo que abrasivos menores pontiagudos causaram microcorte e abrasivos maiores com pontas arredondadas causaram microsulcamento

Os estudos sobre o efeito do tamanho do abrasivo para a abrasão a três corpos são, entretanto, mais escassos (RABINOWICZ *et al.* 1961; MISRA e FINNIE 1981; MILLER 1980; WIROJANUPATUMP e SHIPWAY 2000; TOZETTI *et al.* 2013) e por isso um dos objetivos desta dissertação é verificar o efeito do tamanho do abrasivo e do TCA.

2.3.2. Efeito do meio aquoso

Os estudos da abrasão em água são importantes, uma vez que muitas operações de moagem ou de manipulação do solo ocorrem em ambientes úmidos ou com a presença de soluções aquosas diversas, que podem fazer com que a corrosão ocorra adicionalmente em interação com outros modos de desgaste, como por exemplo a abrasão, alterando o tribossistema. Esse componente nem sempre é aparente, pois a ação abrasiva remove continuamente os produtos da corrosão, não sendo observada a popularmente conhecida “ferrugem”.

Quando o fenômeno de corrosão interage com o fenômeno de abrasão, resulta em uma taxa de desgaste do processo conjunto, corrosão e abrasão, muito maior que a soma das taxas por corrosão e por abrasão. Essa interação é denominada por sinergismo abrasão-corrosão. Este fenômeno é relatado na literatura por alguns autores (SINGLETON e BLICKENSDEFER 1985; MADSEN 1988; ROVERI e CHAVES 2011), que justificam que a abrasão é acelerada pela corrosão devido ao produto da corrosão tratar-se de um material oxidado, de fácil remoção por meio da ação mecânica dos abrasivos.

Toro *et al.* (2001), realizaram ensaios de erosão-corrosão em amostras de aço inoxidável com diferentes composições químicas. Os autores utilizaram duas soluções aquosas, sendo elas a água marítima considerada corrosiva e a água potável considerada não corrosiva. Com a variação das soluções aquosas, os autores mostraram que a somatória da perda de massa das amostras no ensaio de erosão, com abrasivo e água potável, e no ensaio de corrosão, apenas com água marítima, foi menor do que a perda de massa do ensaio erosão-corrosão, com abrasivo e água

marítima, ou seja, a somatória dos resultados do ensaio de desgaste com o ensaio de corrosão são menores do que quando unificados em um ensaio, configurando o fenômeno de sinergismo desgaste-corrosão.

Assim como a abrasão é acelerada pela corrosão, pode ocorrer também o aumento da severidade de corrosão devido a ação da abrasão. Esse fenômeno foi relatado na literatura (STEIGERWALD 1974; PANAGOPOULOS 1997), sendo justificado devido à remoção de filmes protetivos por meio da abrasão, expondo o material fresco ao meio, aumentando a tendência de reação da superfície e da formação de produtos de corrosão.

Os ensaios de abrasão em água têm além do apelo tecnológico, importância acadêmica por sua natural associação à corrosão, permitindo conhecer e quantificar o efeito da corrosão sobre o desgaste abrasivo. A seguir são apresentados alguns estudos de abrasão realizados variando-se o pH do meio corrosivo.

Noel e Ball (1983) avaliaram a efeito da corrosão em diferentes níveis de severidade de desgaste abrasivo, variando carga aplicada aos ensaios de abrasão a dois corpos na configuração pino contra-lixo, realizados com aço carbono (0,15% C e 0,44% Mn). Os autores verificaram que com o aumento da severidade do desgaste, por meio do aumento da carga aplicada, a porcentagem de contribuição da corrosão no desgaste diminui, sendo justificado pelos autores pelo fato de o aumento da carga aplicada aumentar a taxa de desgaste por abrasão, mas a taxa de corrosão permanece inalterada, sendo assim a porcentagem de contribuição da corrosão decresce.

Gangopadhyay e Moore (1985) realizaram ensaios em moinhos, submetendo bolas de aço com alto teor de carbono (0,89% C), com microestrutura martensítica, a diferentes misturas de solução aquosa e abrasivo, variando-se o pH da solução em 4,0, 8,0 e 11,0. Os autores verificaram que a redução do pH inicial do meio aumentou a taxa de desgaste das bolas ensaiadas, sendo explicado pelo fato da redução do pH nas condições ensaiadas aumentar a tendência de dissolução anódica ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$).

Moore *et al.* (1988) consideram que a abrasão favorece a corrosão por meio da destruição de todas as camadas protetoras da superfície, pelo aumento da rugosidade da superfície desgastada e pela corrosão induzida por meio da deformação dos sulcos e riscos da superfície desgastada.

Shipway e Wirojanupatump (2002) realizaram ensaios de abrasão a três corpos, na configuração roda de borracha, submetendo amostras de aço carbono com dureza de 225 HV a dois diferentes meios aquosos, sendo eles um neutro e um ácido, e a seco. Para a realização dos ensaios foi utilizada areia como abrasivo. Os autores mostraram que quando comparados os ensaios em meio aquoso, ocorreu uma maior taxa de desgaste quando utilizado solução ácida em comparação com a solução neutra, evidenciando a ação corrosiva do meio. Já nos ensaios a seco a taxa de desgaste foi maior do que nos ensaios em presença de água, não ocorrendo o fenômeno de sinergismo abrasão-corrosão como reportado por outros autores (SINGLETON e BLICKENSDECKER 1985; MADSEN 1988; ROVERI e CHAVES 2011). A justificativa encontrada pelos autores foi de que nos ensaios em presença de solução aquosa, a mesma é responsável por lubrificar o contato entre o abrasivo e o corpo de prova, não permitindo o rolamento do abrasivo sobre a superfície a ser desgastada, o que foi evidenciado por meio da análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Os autores observaram que nos ensaios a seco ocorre danos severos na superfície desgastada, causando ruptura da superfície, mostrando que o desgaste estava ocorrendo por endentações múltiplas com posterior fratura dúctil. Nos ensaios em presença de água ocorreu alteração no movimento do abrasivo. Os autores observaram finas marcas de desgaste por sulcamento e por microcorte, não apresentando danos severos a superfície. Comparando as superfícies desgastadas em meio aquoso observou-se que ação corrosiva no meio ácido, ocorrendo na superfície de desgaste formação de pontos de corrosão, definido pelos autores por pites alongados.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos por Roveri e Chaves (2011), que realizaram ensaios em bolas de moinho, utilizando dois materiais para avaliação da resistência ao desgaste, em função da variação do pH do meio e do concentrado a ser moído. Os autores mediram menores taxas de desgaste, para amostras de aço carbono e ferro fundido branco de alto cromo, nos ensaios com pH de 10,5 em comparação aos ensaios com pH menos alcalino, de 8,5.

Roveri e Chaves (2011) também estudaram o efeito da corrosão em função da severidade de desgaste. A variação da severidade de desgaste foi realizada variando a porcentagem de areia no concentrado de ferro a ser submetido à moagem, e como a

areia apresenta dureza superior ao minério, quanto maior a quantidade no concentrado maior a severidade. Foram utilizados dois concentrados contendo 1,8 % e 6 % de sílica. Os autores observaram que o efeito do pH é menos pronunciado para condições mais severas, como mostrado na Tabela 2 em que a variação da taxa de desgaste para as bolas de aço na condição com 1,8% de sílica foi de 11,7 % quando alterado o pH de 8,5 para 10,5 e para a condição mais severa com 6 % de sílica essa variação foi de 4,16 %.

Roveri e Chaves (2011) ainda mostraram que o efeito da dureza é mais importante na resistência ao desgaste do que o efeito da corrosão. Para a condição menos severa (1,8 % de sílica) para o pH 8,5 o aumento da dureza dos materiais ensaiados de 49,01 HRC para 61,50 HRC resultou em um diferença de 62,82 % entre as taxas de desgaste e para o pH 10,5 resultou em 59,09 % de diferença, enquanto que quando analisado os resultados para as bolas de aço, a variação do pH de 8,5 para 10,5 resultou em uma variação de 11,70 % e de 6,70 % para as bolas de ferro fundido.

Tabela 2 - Taxa de desgaste em função da variação do pH do concentrado de: (a) 1,8 % de sílica; (b) 6 % de sílica (ROVERI e CHAVES 2011).

(a)

Material	Dureza (RC)	pH		Taxa de desgaste Δ (%)
		8,50	10,5	
Aço	49,01	2,85	2,52	-11,70
FF	61,50	1,06	0,99	-6,70
Taxa de desgaste Δ (%)		62,82	59,09	

(b)

Material	Dureza (RC)	pH		Taxa de desgaste Δ (%)
		8,50	10,5	
Aço	49,01	3,12	2,99	-4,16
FF	61,50	1,10	1,04	-5,76
Taxa de desgaste Δ (%)		-64,74	-65,21	

Efremenko e colaboradores (2013) realizaram ensaios em moinho de bolas submetendo amostras de aços e ferros fundidos a lamas abrasivas com diferentes valores de pH, variado com a adição de ácido sulfúrico ou hidróxido de sódio, e utilizando alumina como abrasivo. Os autores mostraram que com a variação do valor

do pH da lama, a taxa de desgaste das amostras foram significativamente alteradas, sendo que na transição de um meio fortemente alcalino (pH 14) para um neutro (pH 7), a taxa de desgaste aumentou em até 25 %. Com a alteração do meio, passando a ser ácido (pH 1), ocorreu um aumento na taxa de desgaste em relação ao meio neutro (pH 7) de até 154 %. Os autores supõe que para a faixa de pH de 5 a 14, ocorre a formação de uma camada superficial que inibe a corrosão, justificando assim a variação das taxas de desgaste entre os meios ácidos e alcalinos. Os autores também mostraram que para os meios alcalinos e neutro ocorreu a formação de óxidos de ferro, Fe_2O_3 e Fe_3O_4 , na superfície de aços carbono. Por outro lado, para os meios ácidos ocorreu a formação de sulfato de ferro.

A revisão bibliográfica apresentada sobre a influência do meio aquoso na abrasão permitiu destacar que o aumento do pH do meio resulta em redução da taxa de desgaste. A segunda conclusão da revisão bibliográfica apresentada é que o aumento da severidade de desgaste diminui a contribuição relativa da corrosão no desgaste, para condições de aumento de severidade devido aumento da carga aplicada ou maior porcentagem de abrasivo de maior dureza na mistura abrasiva.

O efeito da corrosão, devido à variação do pH da solução, e sua eventual interação com o aumento da severidade do desgaste, devido a variação do tamanho do abrasivo não foi relatada na literatura e será então avaliada neste trabalho.

2.3.3. Efeito da microestrutura

Diesburg e Borik (1974) submeteram amostras de aços e ferros fundidos com diferentes microestruturas a ensaios de abrasão a dois corpos, na configuração pino contra lixa, e a três corpos, na configuração roda de borracha. Os autores mostraram que em ensaios de abrasão a dois corpos os materiais com matriz austenítica apresentaram maior resistência ao desgaste, e por outro lado, nos ensaios de abrasão a três corpos a matriz martensítica apresentou maior resistência ao desgaste. Segundo os autores os testes provocam mecanismos diferentes de interação entre o abrasivo e a microestrutura, alterando assim o desempenho dos materiais quando comparados em

testes diferentes, mas os mesmos não explicitaram as diferenças de interação.

Allen e Ball (1981) estudaram a resistência à abrasão e corrosão de aços inoxidáveis com diferentes microestruturas, submetendo corpos de prova a ensaios de abrasão a dois corpos a seco. Os autores verificaram que os materiais com matriz austenítica apresentaram maior resistência ao desgaste quando comparados com os materiais de matriz martensítica e matriz ferrítica. Os autores justificam que a maior resistência da matriz austenítica se deve à capacidade de acomodar tensões elevadas antes de o material ser desgastado, bem como ao endurecimento da superfície, propiciado pela transformação martensítica da austenita.

O efeito da microestrutura no desgaste abrasivo foi investigado detalhadamente para ferros fundidos brancos com alto cromo por Zum-Gahr e Eldis (1980). Os resultados mostram que os materiais com matriz austenítica têm melhor desempenho que materiais com matriz martensítica, quando submetidos a ensaios de abrasão a dois corpos na configuração pino contra lixa, sendo justificado pela capacidade de trabalho de endurecimento e alta ductilidade da austenita.

O efeito simultâneo da microestrutura e do tamanho do abrasivo foi também investigado no sistema pino contra lixa e verificou-se que os materiais de estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) tinham um aumento linear da perda de massa com o aumento do tamanho do abrasivo, enquanto que nos materiais de estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) a perda de massa se estabilizava a partir de um certo tamanho de abrasivo, como se vê na Figura 15 (CORONADO e SINATORA 2011b). Entretanto, afirmar que existe uma relação geral entre a estrutura cristalina e o efeito do tamanho do abrasivo é duvidosa, tendo em vista que foram ensaiados poucos materiais, com propriedades como ductilidade e tenacidade a fratura diferentes, não sendo possível prever qual seria o resultado para estruturas cristalinas diferentes com propriedades mecânicas muito similares.

Figura 15 - Perda de massa em função do tamanho do abrasivo para materiais com estruturas cristalinas diferentes, CFC (alumínio) e CCC (aço 1045). (Adaptado de CORONADO e SINATORA 2011b).

O comportamento do material de estrutura cristalina CFC, alumínio, já havia sido mostrado na literatura (NATHAM e JONES 1966), mas a explicação do formato das curvas baseado na morfologia do cavaco formado, mostrado por Coronado e Sinatora (2011b), estabeleceu uma relação de causalidade relacionando a estrutura cristalina ao formato das curvas de desgaste em função do tamanho do abrasivo apenas para a abrasão a dois corpos, como a que ocorre no ensaio pino contra lixa.

Coronado e Sinatora (2011a) também estudaram o comportamento do ferro fundido branco com matriz austenítica e outro com matriz martensítica, em ensaios de abrasão a dois corpos variando o tamanho do abrasivo. Os resultados são apresentados na Figura 16, onde para abrasivos menores que 36 μm os materiais apresentaram perdas de massa iguais, e para os tamanhos de abrasivo entre 66 e 116 μm o material com matriz austenítica apresentou maior resistência ao desgaste, menor perda de massa. Os autores explicam essa diferença devido a maior dureza da matriz martensítica, associada a menor ductilidade, ou seja, a deformação necessária para criar um cavaco é menor do que para a matriz austenítica.

Figura 16 – Relação entre perda de massa e tamanho de abrasivo para ferro fundido branco de matriz martensítica e de matriz austenítica (adaptado de CORONADO e SINATORA 2011a).

Segundo Efremenko *et al.* (2013) a resistência ao desgaste por abrasão-corrosão de ligas a base de Ferro dependem tanto da microestrutura quanto da composição química, mas com a influência da microestrutura sendo mais significativa. Os autores mostraram que para aços com mesma composição química e também com composições diferentes, os com matriz martensítica apresentaram maior resistência ao desgaste do que os aços com matrizes austenítica e ferrítica, quando submetidos a ensaios de moagem, com pH da solução variando entre 1 e 14.

A revisão da literatura (DIESBURG e BORIK 1974; ZUM-GAHR e ELDIS 1980; ALLEN e BALL 1981; CORONADO e SINATORA 2011a) permitiu destacar que em condições de ensaios de abrasão a dois corpos os materiais com matriz austenítica apresentaram resistência ao desgaste superior aos materiais com matriz martensítica. Por outro lado, quando os ensaios de abrasão foram realizados na condição a três corpos os materiais com matriz martensítica apresentaram resistência ao desgaste superior em relação aos materiais com matriz austenítica (DIESBURG e BORIK 1974; EFREMENKO *et al.* 2013).

2.4. O aço Hadfield

O aço manganês austenítico, ou aço Hadfield, como ficou conhecido devido ao nome de seu inventor, Robert Abbot Hadfield, foi desenvolvido em 1882 (GOUSSELAND 1974). Desde seu desenvolvimento até a atualidade, esse material encontrou grande utilização em aplicações que requerem elevada resistência à abrasão e ao impacto. Este material apresenta estrutura austenítica na temperatura ambiente, conciliando alta tenacidade e ductilidade associadas a uma elevada capacidade de endurecimento propiciada pelo trabalho.

Mesmo na atualidade, com diversas ligas comerciais e placas revestidas resistentes ao desgaste, o aço Hadfield continua sendo amplamente utilizado, em alguns casos com pequenas modificações em sua composição e no tratamento térmico, em aplicações de movimentação de terra, mineração, ferrovias e dragagem.

Inicialmente com composição química proposta de 1,2 % de Carbono e 12,5 % de Manganês (GOUSSELAND 1974), o aço Hadfield foi modificado com o passar do tempo, com alterações das concentrações de carbono e manganês, além da adição de outros elementos de liga como nióbio, molibdênio, silício, fósforo, boro, entre outros. Poucas destas variações no aço Hadfield resultaram em melhorias significativas e suas utilizações são restritas a aplicações específicas (AVERY 1949).

Em geral, a austenita apresenta boa capacidade de endurecimento e alta ductilidade. A adição de manganês provoca estabilização da austenita no aço Hadfield, diminuindo a temperatura de sua transformação, mas sem eliminá-la totalmente.

O aço Hadfield apresenta grande capacidade de endurecimento quando solicitado em trabalho, seja em situações de impacto, de abrasão ou de abrasão por impacto. Tal endurecimento pode ser explicado devido aos possíveis fenômenos listados a seguir:

- Durante a deformação, átomos intersticiais de carbono são capazes de difundirem para defeitos, tais como discordâncias e falhas de empilhamento, bloqueando-os (JOST E SCHMIDT 1986; ZUM-GAHR 1987);

- Formação de maclas de deformação, que atuam como barreiras para o movimento de discordâncias, fenômeno análogo ao refino de grão (ADLER *et al.* 1986; VATAVUK E GOLDENSTEIN 1987; ATABAKI *et al.* 2012);

- Transformação da austenita em martensita (BHATTACHARYYA 1966; JOST E SCHMIDT 1986; ZUM-GAHR 1987).

Jost e Schmidt (1986) submeteram amostras de aço Hadfield com diferentes teores de manganês a ensaios de abrasão a dois corpos, na configuração pino contra lixa. Os autores verificaram que para as condições impostas, as amostras com teores de 6 % e de 4 % de manganês apresentam maior resistência ao desgaste associada a maior microdureza da superfície desgastada, chegando a 1200 HV. Amostras com 8 % e 12 % de manganês apresentaram menor microdureza após o ensaio, 710 HV, e consequentemente menor resistência ao desgaste.

Transformações de fase no aço Hadfield, quando submetido a ensaios de abrasão a dois corpos, foram estudadas por Zum-Gahr (1987), em que para os aços com teor de 6 % de manganês a transformação martensítica ocorreu em aproximadamente 92 % da superfície desgastada, e para as amostras com 12 % de manganês a transformação ocorreu apenas em torno de 5 % da superfície de desgaste.

Ensaio de abrasão a dois corpos foram realizados com amostras do aço Hadfield por Abbasi *et al.* (2010), cujos resultados apresentados no trabalho mostram que a resistência ao desgaste do material cresceu com o aumento da severidade de desgaste, imposta pelo aumento da carga aplicada. Os autores mostraram que na fase inicial do desgaste a perda de massa das amostras foi elevada, ocorrendo intensas deformações plásticas. Após esta etapa, a superfície desgastada entrou em trabalho de endurecimento, reduzindo a taxa de desgaste e com partículas de desgaste menores do que na etapa inicial. A superfície desgastada atingiu microdureza de 502 HV, sofrendo aumento de aproximadamente 2,5 vezes em relação a microdureza antes do ensaio, para ensaio com carga aplicada de 90 N.

Atabaki *et al.* (2012) realizaram medições de dureza em amostras de aço Hadfield antes e após ensaios de desgaste na configuração pino contra disco, mostrando o endurecimento da superfície desgastada. A dureza da superfície desgastada foi 1,8 vezes maior em relação à dureza inicial, aumentando de

28 para 52 HRC. Os autores também mostraram que a resistência à abrasão das amostras do aço Hadfield aumentaram ao longo do ensaio, devido ao aumento da dureza das amostras em função do tempo de ensaio. Os autores ainda analisaram após os ensaios as partículas de desgaste, mostrando que para o aço Hadfield os cavacos obtidos foram descontínuos .

A revisão da literatura apresentada permite destacar que alterações microestruturais e encruamento durante o uso do aço Hadfield são importantes para o controle da taxa de desgaste, e ainda, devido ao endurecimento propiciado por essas alterações, o conhecimento da dureza inicial não é suficiente para prever a resistência à abrasão deste material.

3. Objetivos da Dissertação

Esta dissertação tem como objetivo acadêmico verificar em que condições de tamanho de abrasivo e de pH do meio o desgaste abrasivo do aço Hadfield é mínimo. Almeja-se estudar se para ensaios realizados com abrasivos soltos o efeito do tamanho do abrasivo apresenta um tamanho crítico, como na abrasão a dois corpos. Em relação ao pH pretende-se verificar qual a relação entre essa variável e o tamanho do abrasivo. O estudo será feito comparando o aço Hadfield, empregado como material de desgaste em britadores, de matriz austenítica com o aço H-13 de matriz martensítica.

Esta dissertação tem como objetivo tecnológico contribuir com conhecimentos que permitam minimizar o desgaste abrasivo de aços Hadfield em função do pH e do tamanho do abrasivo.

4. Materiais e Métodos

Dois aços com diferentes microestruturas, sendo eles o aço Hadfield com matriz austenítica e o aço H-13 com matriz martensítica foram submetidos aos ensaios

de abrasão para investigar o efeito do tamanho da partícula abrasiva e do pH da solução aquosa. O aço H-13 é um material de referência proposto pela norma ASTM-G65, e sua utilização possibilita comparações entre os resultados obtidos neste trabalho com outros resultados, tomando-se por base este material.

4.1. Corpos de prova

Os corpos de prova foram fabricados mediante corte por eletroerosão a fio com dimensões de 25,4 mm de largura, 76,2 mm de comprimento e 12,5 mm de espessura. Os corpos de prova do aço Hadfield foram retirados de partes de mandíbulas de britadores não submetidas ao trabalho contra o minério.

Os corpos de prova do aço H-13 foram retirados de chapas laminadas submetidos a tratamento térmico na empresa Sou Metal, seguindo o procedimento proposto pela norma ASTM-G65, como a seguir:

- Austenitizar entre 1.010 e 1.024°C em banho de sal neutro por 25 minutos;
- Resfriamento em ar até temperatura ambiente;
- Duplo revenimento a 593°C por 2 horas cada. Resfriamento em ar entre revenimentos.

Todos os corpos de prova, após etapa de corte, passaram por acabamento superficial de retífica, visando garantir paralelismo entre a amostra e porta amostra e também mantendo o mesmo padrão de rugosidade inicial.

Na Tabela 3 são apresentadas as composições químicas dos materiais, obtidas por espectrometria de plasma, com exceção dos elementos carbono e enxofre que foram obtidos por combustão.

Tabela 3 – Composição química dos materiais (% massa).

	% massa							
Material	C	Mn	Cr	Mo	V	Si	Ni	S
H-13	0,44	0,34	5,6	1,34	1,1	0,85	0,098	0,002
Hadfield	1,11	14,2	1,81	0,023	0,025	0,90	0,16	0,002

O aço Hadfield, em questão, apresenta composição química similar a Classe C,

de acordo com a classificação proposta pela norma ASTM A128 (2012), apresentando diferença apenas no teor de manganês, em que o proposto pela norma é de no máximo 14% enquanto o encontrado foi de 14,2 %.

O aço H-13 apresentou composição química similar ao proposto pela ASM International (2005), apresentando diferença apenas no elemento cromo, em que o proposto é de no máximo 5,5 % , enquanto o encontrado foi de 5,6 %.

4.2. Preparação metalográfica e caracterização da superfície de desgaste

Para análise da microestrutura dos materiais, foram retiradas amostras dos corpos de prova e embutidas em baquelite com dimensões de 5,0 x 5,0 x 12,7 mm³ e em seguida preparadas passando por processo de lixamento com lixa grana 220 até 1200 e, posteriormente, polimento com diamante de 6 a 1 µm.

As microestruturas do aço H-13 e do aço Hadfield foram reveladas com a aplicação de reagente Nital 2 % (2 ml de ácido nítrico e 98 ml de álcool etílico) por imersão durante 30 segundos. Ambas as microestruturas foram observadas com microscópio óptico OLYMPUS BX60M e câmera JVC TK-1380. As análises das superfícies de desgaste foram realizadas em microscópio eletrônico de varredura (Jeol JSM – 6010LA).

Medições da máxima profundidade da marca de desgaste foram realizadas utilizando paquímetro digital marca Mitutoyo, modelo CD-8” CX-B, com resolução de 0,01 mm, na região central da marca. Para cada condições foram realizadas 3 medições.

4.3. Dureza

Ensaio de macro dureza foram realizados utilizando método Vickers, com Durômetro, marca Buehler, modelo VMT-7, aplicando carga de 30 kgf durante 15 segundos e os resultados apresentados são uma média de 5 medições.

Os ensaios de microdureza foram realizados também utilizando o método Vickers, com Durômetro marca Buehler, modelo MMT-3 e aplicando carga de 300 gf durante 15 segundos e os resultados apresentados são média de 10 medições. Para a realização das medições de dureza nas amostras após os ensaios foram realizadas endentações na região central da superfície de desgaste e no meio dos riscos causados pelos abrasivos, permitindo uma melhor nitidez da impressão de dureza.

Para a realização do perfil de microdureza na secção transversal dos corpos de prova, os mesmos foram cortados mediante eletroerosão a fio na região central da superfície de desgaste. Medições foram realizadas até que microdureza apresentasse valor igual a do núcleo do material. Para cada distância da superfície foram realizadas cinco medições.

4.4. Ensaios de desgaste

Ensaios de desgaste com abrasivo solto foram realizados na configuração roda de borracha a úmido utilizando o abrasômetro apresentado na Figura 17. Neste ensaio, durante 10 minutos o corpo de prova é pressionado com uma carga constante de 130 N aplicada por peso morto contra uma roda revestida com borracha, girando com rotação de 200 rpm em uma mistura de 1.500 gramas de abrasivo e 940 ml de solução aquosa. Pás posicionadas nas duas faces da roda agitam e direcionam a mistura abrasiva a passar entre a amostra e o revestimento da roda.

Foi utilizada areia como abrasivo em diferentes granulometrias, variando de 150 a 2.400 μm . Os valores iniciais de pH das soluções foram 5,5, 7,0 e 12,7.

Antes e após a realização dos ensaios, os corpos de prova foram desmagnetizados utilizando desmagnetizador elétrico, limpos em banho ultrassônico de álcool por 10 minutos, secados utilizando ar comprimido (com sistema de separação de água e óleo) durante 1 minuto e, por fim, pesados em balança eletrônica de precisão com sensibilidade de 0,001 g, marca Marte e modelo AD500. A perda de massa foi obtida por meio da diferença de massa do corpo de prova antes e após o ensaio.

Figura 17 – (a) Abrasômetro roda de borracha a úmido e (b) diagrama esquemático do ensaio (adaptado de ASTM G-105), em que a roda revestida com borracha diâmetro apresenta diâmetro de 228 mm.

Para realizar a coleta de partículas de desgaste, foi utilizado um ímã acoplado a um dispositivo fixado ao porta amostra, de tal modo a ficar localizado no sentido de saída do fluxo de abrasivo. O dispositivo é apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Dispositivo magnético para coleta de partículas de desgaste.

4.5. Abrasivos

Foi utilizada areia Normal Brasileira fornecida pelo IPT-SP (Instituto de

Pesquisas Tecnológicas) como o abrasivo em diferentes granulometrias. Os tamanhos dos abrasivos utilizados são listados abaixo em função do número de aberturas da peneira por polegada linear, “mesh” (#), sendo elas:

- #100: Material passante na peneira com abertura de 0,30 mm e retido na peneira de 0,15 mm.

- #50: Material passante na peneira com abertura de 0,60 e retido na peneira de 0,30 mm.

- #30: Material passante na peneira com abertura de 1,20 mm e retido na peneira de 0,60 mm.

- #16: Material passante na peneira com abertura de 2,40 mm e retido na peneira de 1,20 mm.

Os tamanhos de areia foram caracterizados permitindo conhecer o tamanho médio das partículas, a esfericidade que compreende a relação entre área da partícula e seu perímetro ($SPHT = 4\pi A/P^2$) podendo atingir o valor máximo de 1,0 para o caso de uma esfera perfeita e a relação de aspecto (b/l) que corresponde à relação entre a menor dimensão (b) e a maior dimensão (l), sendo que menores valores correspondem a partículas alongadas. A caracterização foi realizada por análise de imagens dinâmica utilizando o analisador de tamanho e forma de partículas CAMSIZER do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia e Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP.

4.6. Soluções aquosas

Na primeira série de ensaios foram utilizadas três diferentes soluções aquosas, com valores iniciais de pH de 5,5, 7,0 e 12,7, sendo que as duas últimas foram obtidas adicionando NaOH sólido (pureza de 97 %) em água deionizada com valor de pH 5,5. Foi elaborada uma quarta solução, utilizando-se solução tampão com pH 5,5, preparada adicionando 20 mililitros de ácido acético (pureza de 99,7 %) e 30 gramas de NaOH em dez litros de água deionizada, sendo o pH corrigido, caso necessário, após as medições adicionando 1 mililitro de ácido por vez.

As soluções aquosas tiveram seus valores de pH medidos antes, durante e após os ensaios, utilizando pHmetro digital, marca Gehaka, modelo PG2000, apresentado na Figura 19. O equipamento foi aferido periodicamente utilizando solução tampão com pH 4,0 e com pH 7,0.

Figura 19 - pHmetro Digital Gehaka utilizado nas medições de pH.

Foram realizadas análises químicas das soluções aquosas após os ensaios por espectrometria de plasma, visando obter os teores de Ferro e Silício. As análises foram realizadas pelo Laboratório de Análises Químicas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (CQuiM-IPT) utilizando espectrômetro de emissão atômica de plasma marca Varian e modelo Vista MPX. Para cada condição foram realizadas três repetições.

4.7. Perfilometria

Medições de rugosidade foram realizadas nas amostras após o ensaio na região central da superfície de desgaste de ensaios realizados com pH de 5,5 , 7,0 e 12,8 e com tamanho de abrasivo #100 (0,15 – 0,30 mm) e para todos os tamanhos de abrasivo em ensaios com pH 5,5. Foi utilizado perfilômetro óptico 3D, modelo CCI MP e marca Taylor-Hobson. Foi adquirido o parâmetro Sz, que é definido como o valor médio da altura absoluta dos cinco picos mais altos e a profundidade dos cinco vales mais profundos, sendo este relacionado à profundidade máxima devido a penetração do abrasivo. Pintaúde (2002) mostrou que o parâmetro Sz pode representar a profundidade máxima de penetração de uma superfície desgastada por partículas

abrasivas, em que foram comparados alguns resultados encontrados na literatura, da profundidade máxima de sulcos, com medições de Sz realizadas pelo autor, chegando a conclusão de que os valores eram semelhantes.

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos.

5. Resultados

Os resultados serão apresentados na seguinte ordem: caracterização dos materiais e do abrasivo, primeira série de ensaios de desgaste e segunda série de ensaios de desgaste.

5.1. Caracterização dos materiais e do abrasivo

Apresenta-se a seguir a caracterização dos materiais e do abrasivo utilizado.

5.1.1. Microestrutura

Na Figura 20, mostra-se a microestrutura do aço H-13, de matriz martensítica revenida, obtida em microscópio óptico.

Figura 20 – Micrografia do Aço H-13, com matriz martensítica revenida, atacada com Nital 2 % e com aumento de 1000x.

Na Figura 21 é apresentada a microestrutura do Aço Hadfield, de matriz austenítica apresentando algumas porosidades em contornos de grão (pontos escuros) e de inclusões (pontos escuros na matriz), provenientes do processo de fundição da mandíbula do britador em que foram retirados os corpos de prova.

Figura 21 – Micrografia do Aço Hadfield, com matriz austenítica atacado com reagente Nital 2 % e com aumento de 100X.

5.1.2. Dureza antes dos ensaios de desgaste

Os valores de macro e micro dureza das superfícies retificadas do aço H-13 e do aço Hadfield são apresentados na Tabela 4. Os resultados são médias de 5 repetições para a macro dureza e de 10 repetições para a micro dureza. O aço H-13 apresentou maior valor de macro dureza. Para a micro dureza, o aço Hadfield apresentou maior valor do que o aço H-13.

Tabela 4 – Macro e micro dureza dos aços H-13 e Hadfield.

Material	Macro Dureza superfície retificada (HV30)	Micro Dureza da superfície retificada (HV0,3)
H13	520 ± 6	588 ± 22
Hadfield	251 ± 8	712 ± 52

Os valores elevados de micro dureza dos dois materiais, comparados com os de macro dureza, são justificados pelo encruamento propiciado pela preparação da superfície retificada das amostras. A micro dureza do aço Hadfield é maior que a do aço H-13 na superfície a ser usada para o ensaio de desgaste. Podem haver duas explicações para isso. A primeira é que a capacidade de encruamento do aço Hadfield é maior que a do aço H-13. A segunda é que a camada encruada pela retificação é maior para o aço Hadfield do que para o H-13. Esse aspecto será discutido posteriormente no Capítulo 5.2.2 (Microdureza após o ensaio).

5.1.3. Abrasivo

Todos os tamanhos de abrasivo foram observados em microscópio eletrônico de varredura e são apresentados na Figura 22.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 22 – MEV dos abrasivos, com tamanho de: (a) #100 (0,15 a 0,30 mm); (b) #50 (0,30 a 0,60 mm); (c) #30 (0,60 a 1,20 mm); (d) #16 (1,20 a 2,40 mm).

Na Tabela 5, são apresentados os resultados da caracterização de tamanho e forma realizadas no equipamento CAMSIZER.

Tabela 5 – Caracterização dos abrasivos utilizando equipamento CAMSIZER

Areia	Tamanho do abrasivo		Forma	
	média [mm]	desvio padrão	Esfericidade (SPHT)	b/l
#100 (0,15 - 0,30 mm)	0,204	0,071	0,798	0,702
#50 (0,30 - 0,60 mm)	0,455	0,111	0,790	0,701
#30 (0,60 - 1,20 mm)	0,968	0,205	0,803	0,707
#16 (1,20 - 2,40 mm)	1,827	0,419	0,826	0,710

Os abrasivos em seus variados tamanhos apresentaram formas similares, tanto no parâmetro esfericidade (SPHT) quanto na relação de aspecto (b/l), sendo que a diferença máxima encontrada para a esfericidade foi de aproximadamente 4 % entre os tamanhos de abrasivo e para a relação de aspecto diferença máxima foi de aproximadamente 1 % entre os tamanhos de abrasivo. Os resultados da caracterização dos tamanhos de abrasivo elimina uma variável para o efeito do tamanho do abrasivo

proposta na literatura (WIROJANUPATUMP e SHIPWAY 2000; CORONADO e SINATORA 2011a), de que abrasivos menores apresentam forma diferente de abrasivos maiores, favorecendo a mudança de mecanismos de desgaste com a variação do tamanho do abrasivo.

5.2. Primeira série de ensaios de desgaste

5.2.1. Ensaios de desgaste

A variação da perda de massa do aço H-13 em função do tamanho do abrasivo e do pH do meio é apresentada na Figura 23. Os valores individuais de perda de massa de todos os ensaios estão apresentados no Anexo A.

Figura 23 – Perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 em função do tamanho do abrasivo e do pH da solução aquosa. Não é possível visualizar algumas barras de desvio padrão devido ao pequeno valor apresentado.

A perda de massa do aço H-13 aumenta com o aumento do tamanho do abrasivo para os três valores de pH estudados. O aumento do pH reduz a perda de massa do aço H-13 para todos os tamanhos de abrasivo, ou seja, menores perdas de

massa foram obtidas nos ensaios realizados com pH de 12,8 e maiores perdas massa foram obtidas para o valor de pH de 5,5. Comparando a perda de massa com pH 5,5 e com pH 12,8, para todos tamanhos de abrasivo em ordem crescente observa-se uma diferença de 87 %, 41 %, 13 % e 24 %. Em geral, o aumento da severidade do desgaste, devido ao aumento do tamanho do abrasivo, prepondera sobre o efeito relativo corrosivo do meio. Ainda, é possível observar duas regiões de variação de perda de massa, a primeira entre os dois menores tamanhos de abrasivo (#100 e #50), com intensidade maior de variação da perda de massa com a variação do tamanho do abrasivo e, a segunda região, com menor intensidade. A transição entre as duas regiões da curva parece ser delimitada por um tamanho crítico de abrasivo entre as granulometrias #100 (0,15 a 0,30 mm) e #50 (0,30 a 0,60 mm).

Na Figura 24 mostra-se a variação da perda de massa do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo e do pH do meio.

Figura 24 – Perda de massa média (3 repetições) do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo e do pH da solução aquosa. Não é possível visualizar algumas barras de desvio padrão devido ao pequeno valor apresentado.

O comportamento do aço Hadfield, apresentado na Figura 24, foi similar ao apresentado para o aço H-13, cuja perda de massa aumenta com o aumento do

tamanho do abrasivo, sendo possível observar duas regiões de variação de perda de massa, a primeira entre os dois menores tamanhos de abrasivo (#100 e #50), com intensidade maior de variação da perda de massa com a variação do tamanho do abrasivo e, a segunda região, com menor intensidade. A transição entre as duas regiões da curva parece ser delimitada por um tamanho crítico de abrasivo entre as granulometrias #100 (0,15 a 0,30 mm) e #50 (0,30 a 0,60 mm).

Observa-se, também, na Figura 24 que as perdas de massa do aço Hadfield foram menores nos ensaios realizados com maiores valores de pH para cada um dos tamanhos de abrasivo estudados. Comparando a perda de massa com pH inicial de 5,5 e com pH 12,7 para todos tamanhos de abrasivo, em ordem crescente observa-se uma diferença de 95 %, 42 %, 27 % e 20 % mostrando que o aumento da severidade do desgaste prepondera sobre o efeito relativo corrosivo do meio corroborando os dados da literatura (ROVERI E CHAVES 2011), em que foi verificado que o aumento da severidade de desgaste diminui a importância relativa da corrosão na taxa de desgaste.

Os resultados de perda de massa obtidos para os dois materiais contradizem os resultados apresentados por Wirojanupatump e Shipway (2000), que mostraram que para uma faixa de tamanho de abrasivo de 0,125 a 0,500 mm a perda de massa nos ensaios com presença de água foram desprezíveis.

Comparando os dois materiais, em relação a diferença de perda de massa com pH inicial 5,5 e com pH inicial 12,8, para cada tamanho de abrasivo, observa-se que o aço H-13 apresentou menor diferença de perda de massa em comparação ao aço Hadfield para os três menores tamanhos de abrasivo, ou seja, a variação do pH do meio é menos significativa na perda de massa do aço H-13. Sendo assim, afirma-se que o aço H-13 apresenta em geral maior resistência a corrosão em comparação ao aço Hadfield, possivelmente, em decorrência do maior teor de cromo do aço H-13, elemento que eleva a resistência a corrosão em aços ao carbono (FONTANA 1986).

A seguir, na Figura 25, Figura 26 e Figura 27 são apresentadas comparações entre as perdas de massa em função do tamanho do abrasivo para o aço H-13 e aço Hadfield, para os valores de pH inicial de 5,5, 7,0 e 12,8, respectivamente.

Figura 25 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5. Não é possível visualizar algumas barras de desvio padrão devido ao pequeno valor apresentado.

Na Figura 25, para o pH 5,5, nota-se que para todos os tamanhos de abrasivo o aço Hadfield apresentou maior resistência ao desgaste do que o aço H-13. Para o menor tamanho de abrasivo #100 (0,15 – 0,30 mm) o aço H-13 apresentou uma perda de massa de 1,63 vezes maior que o aço Hadfield. Para os demais tamanhos de abrasivo, #50 (0,30 – 0,60 mm), #30 (0,60 – 1,20 mm) e #16 (1,20 – 2,40 mm) a perda de massa do aço H-13 em relação ao aço Hadfield foi, respectivamente, de 1,18; 1,24 e 1,41 vezes maior.

Figura 26 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 7,0. Não é possível visualizar algumas barras de desvio padrão devido ao pequeno valor apresentado.

Na Figura 26, para os ensaios realizados com pH 7,0 , verifica-se que para todos os tamanhos de abrasivo, o aço Hadfield apresentou maior resistência ao desgaste do que o aço H-13. Para os tamanho de abrasivo de #100 (0,15 – 0,30 mm), #50 (0,30 – 0,60 mm) , #30 (0,60 – 1,20 mm) e #16 (1,20 – 2,40 mm) a perda de massa do aço H-13 em relação ao aço Hadfield foi, respectivamente, de 1,18; 1,07; 1,26 e 1,43 vezes maior.

Figura 27 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 e do aço Hadfield em função da granulometria do abrasivo para ensaios com pH 12,8 .

Na Figura 27, para os ensaios realizados com pH 12,8, para todos os tamanhos de abrasivo, o aço Hadfield apresentou maior resistência ao desgaste do que o aço H-13. Para os tamanho de abrasivo de #100 (0,15 – 0,30 mm), #50 (0,30 – 0,60 mm), #30 (0,60 – 1,20 mm) e #16 (1,20 – 2,40 mm) a perda de massa do aço H-13 em relação ao aço Hadfield foi, respectivamente, de: 1,70; 1,18; 1,39 e 1,37 vezes maior.

Para todos os valores de pH, o aço Hadfield apresentou maior resistência ao desgaste. Nas curvas de perda de massa em função do tamanho de abrasivo dos dois materiais existem duas regiões, a primeira entre os dois menores tamanhos de abrasivo (#100 e # 50) com intensidade maior de variação da perda de massa em função da variação do tamanho do abrasivo, e a segunda região onde a intensidade de variação perda de massa é menor com aumento do tamanho do abrasivo. A transição entre as duas regiões da curva ocorre em torno de um tamanho crítico de abrasivo entre as granulometrias #100 (0,15 a 0,30 mm) e #50 (0,30 a 0,60 mm).

Comparando-se a inclinação das duas regiões para os dois aços, nota-se que abaixo do tamanho crítico do abrasivo a taxa de aumento da perda de massa com o tamanho de abrasivo é semelhante para os dois materiais. Já para a região acima do

tamanho crítico do abrasivo o aço Hadfield tem menor taxa de aumento da perda de massa com o aumento do tamanho do abrasivo. Esse efeito foi verificado para os três valores de pH estudados.

O efeito do pH na diferença de perda de massa entre os materiais foi maior para o menor tamanho de abrasivo nos ensaios realizados com pH inicial de 5,5 e de 12,8. Ou seja, o aço Hadfield é muito mais resistente ao desgaste que o aço H-13 nesses dois valores de pH quando utilizado no ensaio o menor tamanho de abrasivo. Por outro lado, nos ensaios com pH inicial de 7,0 o aço Hadfield tem seu maior desempenho relativo para o maior tamanho de abrasivo empregado nos experimentos

Analisando o comportamento da resistência ao desgaste dos materiais, para os valores de pH de 5,5 e 12,8 , para o menor tamanho de abrasivo teve-se a maior diferença entre os valores de perda de massa dos materiais, com essa diferença reduzindo para o tamanho de abrasivo seguinte e aumentando quando analisado os outros dois tamanhos maiores de abrasivo. Para o valor de pH 7,0, inicialmente a diferença de resistência ao desgaste dos materiais diminui com aumento do tamanho do abrasivo, passando a aumentar para os outros maiores tamanhos, com a máxima diferença sendo obtida para o maior tamanho de abrasivo.

Após o TCA, para todos o valores de pH, foi possível observar comportamento linear da variação da perda de massa em função do tamanho do abrasivo para o aço Hadfield. Para o aço H-13, este comportamento linear foi observado apenas para a condição com pH 5,5, não ocorrendo para os valores de pH 7,0 e 12,8, sendo observado um aumento não linear da perda de massa em função do tamanho do abrasivo.

Comparando o comportamento observado na Figura 25, Figura 26 e Figura 27 com os resultados reportados por Coronado e Sinatora (2011a) apresentados na Figura 16, é possível observar uma relação entre os formatos das curvas para os materiais com matriz austenítica, cuja a perda de massa aumenta linearmente até um TCA e continua a aumentar após este tamanho de abrasivo com intensidade de variação menor em função do aumento do tamanho do abrasivo. O mesmo fenômeno foi observado pelos autores para ensaios realizados com alumínio e o comportamento da curva de perda de massa em função do tamanho do abrasivo foi o mesmo, o que

confirma que existe uma tendência de relação entre as curvas de materiais com estrutura cristalina Cúbica de Face Centrada (CFC), sendo eles o alumínio, o ferro fundido branco com matriz austenítica e o aço Hadfield.

Ainda comparando os dois trabalhos, é possível verificar que para os materiais com microestrutura martensítica o comportamento das curvas foi diferenciado. Observando os resultados do aço H-13 apresentados na Figura 25, Figura 26 e Figura 27 nota-se a presença de duas regiões lineares crescentes, uma com maior intensidade de variação em função do aumento do tamanho do abrasivo até o TCA, e outra após o TCA com menor intensidade. Já no trabalho de Coronado e Sinatora (2011a) observa-se uma região linear crescente até o TCA e a perda de massa passa ser constante, independente do tamanho do abrasivo. Ainda, é válido lembrar que os ensaios realizados nos dois trabalhos são diferentes, onde no ensaio pino contra lixa o abrasivo encontra-se fixo a uma das superfícies ocorrendo apenas o deslizamento, já no ensaio roda de borracha o abrasivo encontra-se solto, podendo ocasionar o deslizamento, rolamento ou ambas situações com o abrasivo ao entrar em contato com a superfície.

5.2.2. Microdureza após o ensaio

Foram realizadas medições da máxima profundidade da marca de desgaste (região central da marca) em relação a superfície retificada nos corpos de prova do aço Hadfield e do aço H-13, após os ensaios para todos tamanhos de abrasivo e para o pH 5,5, utilizando paquímetro digital, sendo os resultados apresentados na Tabela 6. É possível observar nos resultados apresentados que a máxima profundidade da marca de desgaste aumenta em função do tamanho do abrasivo para os dois materiais, e que a profundidade em função do tamanho do abrasivo é maior para o aço H-13.

Tabela 6 – Máxima profundidade da marca de desgaste em relação a superfície retificada, média de 3 medições.

Areia	Profundidade [mm]	
	Hadfield	H-13
#100 (0,15 - 0,30 mm)	0,04 ± 0,01	0,09 ± 0,04
#50 (0,30 - 0,60 mm)	0,1 ± 0,01	0,20 ± 0,02
#30 (0,60 - 1,20 mm)	0,25 ± 0,02	0,34 ± 0,02
#16 (1,20 - 2,40 mm)	0,36 ± 0,04	0,48 ± 0,02

Na Figura 28 são apresentados, para o aço Hadfield, os resultados do perfil de microdureza realizados na seção transversal da região central da superfície de desgaste após o ensaio em função do tamanho do abrasivo. Mostra-se ainda, por meio de uma reta horizontal pontilhada a dureza do núcleo da amostra, correspondendo a dureza de uma região não afetada pelo desgaste. Na Figura 29 apresenta-se uma imagem obtida com microscópio óptico sendo possível observar algumas endentações realizadas no perfil de microdureza do aço Hadfield.

Figura 28 - Perfil de microdureza do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo

Observa-se na Figura 28 que a microdureza a 8 micrometros após o ensaio aumenta em função do aumento do tamanho do abrasivo utilizado. É possível verificar que para os dois menores tamanhos de abrasivo não ocorreu variação significativa dos resultados de microdureza em função da profundidade, sendo que a uma distância de 8 μm da superfície desgastada a micro dureza encontrada foi de 420 HV para ambos tamanhos de abrasivo, de 620 HV para o tamanho N30 (0,60 – 1,20 mm) e de 670 HV para o tamanho N16 (1,20 – 2,40 mm). Para o maior tamanho de abrasivo a máxima distância da superfície que apresentou encruamento foi de 135 μm, ou seja, a partir desta distância da superfície a dureza passou a ser a mesma da dureza do núcleo do material. Para os demais tamanhos de abrasivo a profundidade da camada encruada chegou a 35 μm.

Comparando o perfil de microdureza realizado abaixo da superfície retificada com a profundidade da marca da desgaste apresentada na Tabela 6, afirma-se que a camada endurecida devido ao processo de retificada foi removida durante os ensaios de desgaste para todos os tamanho de abrasivo utilizados, pois a camada endurecida por meio da retífica apresentou profundidade de 0,035 mm enquanto a menor profundidade da região central da superfície de desgaste apresentou 0,040 mm, e assim novas camadas endurecidas foram formadas de acordo com o abrasivo utilizado na região central da marca.

Figura 29 – Imagem do perfil de microdureza do aço Hadfield obtida em microscópio óptico com aumento de 500x.

Tanaka (2011) realizou medições de dureza na seção transversal de uma amostra de britador de mandíbula, de onde foram retiradas amostras para essa dissertação, após sua utilização em serviço. O autor encontrou dureza de 600 HV na região mais próxima da superfície, a 0,5 mm, sendo que a dureza do material foi diminuindo gradativamente até 240 HV a uma profundidade de 6 mm. Os resultados encontrados pelo autor para o perfil de dureza são apresentados na Figura 30, onde foram analisadas 4 regiões da amostra, sendo elas denominadas por A, B, C e D.

Figura 30 – Perfil de dureza de 4 regiões de uma amostra de britador de mandíbula de aço Hadfield analisada após serviço (TANAKA 2011).

Comparando-se os resultados encontrados por Tanaka (2011), apresentados na Figura 30, com o perfil de microdureza obtido neste trabalho (Figura 28), verifica-se que os valores encontrados na camadas encruada de ambos trabalhos são similares quanto ao maior valor de dureza medida, cerca de 600HV em ambos os casos. A profundidade de encruamento, entretanto, é significativamente maior no caso das medidas de dureza feitas na mandíbula removida do britador. O que se pode notar, entretanto, é que tanto no ensaio roda de borracha quanto em serviço no britador, as durezas máximas são semelhantes.

Na Figura 31 são apresentados os resultados de microdureza do perfil realizado em função do tamanho do abrasivo para o aço H-13, bem como o valor da microdureza do núcleo do material sendo este representado por uma linha horizontal pontilhada.

Figura 31 - Perfil de microdureza do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo.

A microdureza do aço H-13 não apresentou variação entre a região mais próxima da superfície (8 μm) e o núcleo do material, sendo assim não foi necessário realizar medições com distância maior do que 8 μm da superfície desgastada, ao contrario do perfil de microdureza apresentado pelo aço Hadfield, onde o encruamento devido ao desgaste com maior tamanho de abrasivo chegou a 135 μm de distância da superfície desgastada.

Foram realizadas medições de microdureza na superfície desgastada após os ensaios de desgaste para todos os tamanhos de abrasivo. A técnica empregada permitiu com que endentações fossem realizadas na superfície desgastada de modo a avaliar o efeito da deformação plástica ocorrida devido à abrasão, como mostrado na Figura 32, obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura. Observam-se que as marcas ficaram bem definidas, o que garante a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 32 – Marcas de endentações para medição de microdureza da superfície desgastada do aço Hadfield utilizando tamanho de abrasivo de #16 (1,20 – 2,40 mm) com aumento de 500 x.

Na Figura 33 são apresentados os resultados de microdureza da superfície desgastada do aço H-13 em função do tamanho do abrasivo, para os ensaios realizados com pH inicial de 5,5.

Figura 33 – Microdureza da superfície desgastada do aço H-13 em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5.

Observa-se uma tendência de aumento da microdureza da superfície desgastada

do aço H-13 com aumento do tamanho do abrasivo. Para o maior tamanho de abrasivo a microdureza foi 9% maior em comparação com a dureza do menor tamanho de abrasivo. Observa-se também que a microdureza após o desgaste é significativamente maior do que a microdureza da superfície retificada para maior tamanho de abrasivo.

Na Figura 34, são apresentados os resultados de microdureza da superfície desgastada do aço Hadfield, em função do tamanho do abrasivo, para os ensaios realizados com pH 5,5.

Figura 34 – Microdureza da superfície desgastada do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5.

Os resultados apresentados na Figura 34 mostram que, com o aumento do tamanho do abrasivo, a microdureza da superfície desgastada do aço Hadfield aumenta significativamente, crescendo continuamente na faixa estudada. A microdureza da superfície desgastada com o maior tamanho de abrasivo #16 (1,20 – 2,40 mm) foi 1,43 vezes maior do que a microdureza quando submetido ao desgaste com o menor tamanho de abrasivo #100 (0,15 – 0,30 mm).

Os valores de microdureza dureza das superfícies desgastadas com os três menores tamanhos de abrasivo foram menores do que o valor da microdureza da superfície retificada, antes do ensaio. Sugere-se a explicação de que, para esses tamanhos, os abrasivos removeram a camada encruada pela retificação (como

mostrado na comparação entre a Figura 28 e a Tabela 6) formando uma nova camada encruada, com menor dureza, característica de cada tamanho de abrasivo.

Os resultados de microdureza após os ensaios realizados com o maior tamanho de abrasivo são condizentes com os valores reportados na literatura por Jost e Schmidt (1986) que encontraram valores de microdureza, após os ensaios de abrasão de aços Hadfield com 8% e 12% de manganês, de 710 HV. Devido a esse valor ser mais elevado que os obtidos na seção transversal, levou a determinação da dureza superficial para todos os tamanhos de grão estudados.

Na Figura 35, é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos de microdureza na superfície desgastada para os aços H-13 e Hadfield.

Na Figura 25, Figura 26 e Figura 27 foi mostrado que o aço Hadfield apresentou menor perda de massa do que o aço H-13 em todas condições ensaiadas, mas em contrapartida observa-se na Figura 35 que para os dois menores tamanhos de abrasivo a microdureza após os ensaios do aço H-13 foi maior do que do aço Hadfield e para os dois maiores tamanhos de abrasivos o resultado se inverteu, com o aço Hadfield passando a ter maior dureza.

Figura 35 – Comparação entre as microdureza das superfícies desgastadas do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH inicial 5,5.

Os resultados apresentados na Figura 35 mostram para o aço Hadfield um endurecimento apreciável após os ensaios, relacionado ao aumento do tamanho do abrasivo, quando comparado à variação de dureza do aço H-13.

Ainda na Figura 35, mostra-se que para os dois menores tamanhos de abrasivo o aço Hadfield apresentou menor microdureza da superfície desgastada em comparação ao aço H-13, porém apresentando menores valores de perda de massa. Como os valores de dureza atingidos após os ensaios para os tamanhos de abrasivo em questão foram inferiores aos valores obtidos para a superfície retificada e para os demais tamanhos de abrasivo, sugere-se que o aço Hadfield não atingiu sua máxima capacidade de encruamento, e sendo assim, o processo abrasivo não causou deformação suficiente para promover o corte do material, prevalecendo o mecanismo de microsulcamento, com remoção de material devido a processos repetidos, que causam menores taxas de remoção de material.

Na Figura 36 são apresentados os resultados de microdureza da superfície desgastada do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo e do pH do meio, sendo variado em 5,5 e 12,8. É possível observar que o pH do meio não influencia na dureza da superfície desgastada.

Figura 36 – Comparação entre as microdurezas das superfícies desgastadas do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5 e pH 12,8.

Mostrou-se na Figura 24 que o pH afeta perda de massa para um mesmo tamanho de abrasivo. As medidas de microdureza na superfície desgastada mostram que o encruamento independe do pH da solução utilizada. Portanto, a diferença de perda de massa parece ser de responsabilidade química quase que exclusivamente. O efeito sinérgico sempre evocado está aquém da sensibilidade de medida de dureza.

5.2.3. Superfícies de desgaste

Após os ensaios de abrasão, as amostras foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura para identificar os micromecanismos de desgaste. Neste item serão apresentadas imagens representativas dessas superfícies, mas o leitor pode observar no Anexo B, deste trabalho as superfícies de desgaste dos aços H-13 e Hadfield após os ensaios realizados com todos os tamanhos de abrasivo.

Nas superfícies de desgaste dos corpos de prova de aço Hadfield e do aço H-13, para os ensaios realizados com o tamanho de abrasivo de #100 (0,15 – 0,30 mm) e #50 (0,30 – 0,60 mm), foi possível observar a presença de sulcos, com e sem acúmulo de material nas bordas. Foi possível também observar cavacos fixados à superfície do aço Hadfield. Nas amostras do aço H-13 foram observadas trincas em pontos isolados, diferente dos demais mecanismos, que estavam em diversas regiões das superfícies de desgaste.

Os diversos eventos abrasivos foram identificados como a seguir: “a” evento alinhado com a direção de deslizamento, “b” evento com inclinação em relação à direção de deslizamento, “c” início do evento, “d” sobreposição de eventos, “e” endentação, “f” fim do evento, “g” acúmulo de material, “h” trinca e “i” cavaco.

(a)

(b)

(c)

Figura 37 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o pH inicial de 5,5 e tamanho de abrasivo de: (a) #100 (0,15 – 0,30 mm) ; (b) #50 (0,30 - 0,60 mm) e (c) #50 (0,30 - 0,60 mm) com ampliações do eventos “a” e “f”.

(a)

(b)

(c)

Figura 38 – MEV da superfície desgastada do aço H-13 em ensaios com pH de 5,5 e o tamanho de abrasivo de: (a) e (b) #100 (0,15 - 0,30 mm); (c) #50 (0,30 – 0,60 mm).

Nas superfícies de desgaste dos corpos de prova do aço Hadfield e do aço H-13, para os ensaios realizados com o tamanho de abrasivo de #30 (0,60 – 1,20 mm) e #16 (1,20 – 2,40 mm), foi possível observar a presença de sulcos, com e sem acúmulo de material nas bordas. Foram observadas regiões de acúmulo de material

decorrentes do deslocamento do material da superfície juntamente com abrasivo incrustado. O acúmulo de material, provavelmente, ocorreu devido à fratura do abrasivo, que passou a servir como uma barreira para outros abrasivos que desgastaram a região. O fenômeno é confirmado por meio de microanálise por energia dispersiva (EDS), mostrando picos de silício e oxigênio, elementos constituintes da sílica (SiO_2), no local de acúmulo de material da superfície.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 39 – MEV da superfície desgastada em ensaios com o tamanho de abrasivo de #30 (0,60 – 1,20 mm) e pH do meio de 5,5 , para o aço: (a) Hadfield com ampliação do evento tipo “g” ; (b) Hadfield – Pontos do EDS ; (c) Hadfield - EDS ponto 1 ; (d) Hadfield - EDS ponto 2 ; (e) H-13 e (f) H-13 com ampliação do evento tipo “g”.

A análise das superfícies de desgaste do aço Hadfield e do aço H-13 permitiu destacar os seguintes resultados:

- Para os dois menores tamanhos de abrasivo, #100 (0,15 – 0,30 mm) e #50 (0,30 – 0,60 mm), foram observados sulcos com e sem acúmulo de material nas bordas e, também, foi observado no aço Hadfield partículas de desgaste fixadas na superfície do material. No aço H-13 foram observadas microtrincas em pontos isolados das superfícies de desgaste;
- Para os dois maiores tamanhos de abrasivo, #30 (0,60 – 1,2 mm) e #16 (1,2 – 2,4 mm), foram observados pontos de incrustação de abrasivo, que serviram como barreiras para o material desgastado, promovendo o acúmulo de material da superfície nessas regiões;
- Para todas as condições analisadas não foi possível identificar o micromecanismo de desgaste predominante, sendo possível observar a presença dos mecanismos de microsulcamento, marcado pela presença de sulcos com acúmulo de material nas

bordas, e de microcorte, sendo confirmado por meio de sulcos sem acúmulo de material nas bordas e de varias endentações.

5.2.4. Partículas de desgaste

Durante os ensaios de abrasão a três corpos foram capturados cavacos provenientes do desgaste das amostras. Neste item serão apresentadas imagens representativas dessas partículas, mas o leitor pode observar no Anexo C figuras obtidas em MEV dos cavacos obtidos nos ensaios realizados com os aços H-13 e Hadfield com pH do meio de 5,5, para todos os tamanhos de abrasivo.

A análise das partículas de desgaste dos ensaios realizados com H-13 permite observar que os cavacos para todos os tamanhos de abrasivo ensaiados apresentam formas contínuas e descontínuas. O EDS realizado em alguns pontos permite comprovar, por meio da composição química, que as partículas de desgaste são provenientes das amostras ensaiadas de aço H-13.

(a)

(b)

(c)

Figura 40 – Cavacos da superfície desgastada do aço H-13 com pH 5,5 e tamanho de abrasivo de: (a) #50 (0,30 – 0,60 mm); (b) #30 (0,60 – 1,20 mm) e (c) #16 (1,20 – 2,40 mm).

As partículas de desgaste do aço H-13, para todos os tamanhos de abrasivo utilizados, foram contínuas e descontínuas. Para os três maiores tamanhos de abrasivo foi possível observar partículas contínuas maiores. Essas partículas observadas com formas alongadas são semelhantes às produzidas no processo de torneamento, em que um lado dessas partículas é liso e outro apresenta superfície lamelar.

A análise das partículas de desgaste do aço Hadfield, com matriz austenítica não magnética, foi possível pois provavelmente ocorreu transformação da austenita em martensita, fenômeno relatado na literatura (JOST e SCHMIDT 1986; ZUM GAHR 1987), com propriedades magnéticas que permitem a captura utilizando imã. Essa transformação martensítica é uma possível justificativa para o endurecimento da superfície do aço Hadfield devido ao desgaste ocorrido na preparação superficial inicial dos corpos de prova.

(a)

(b)

Figura 41 – Cavacos da superfície desgastada do aço Hadfield com o tamanho de abrasivo de : (a) #100 (0,15 – 0,30 mm) ; (b) #16 (1,20 – 2,40 mm).

A análise das partículas de desgaste dos ensaios realizados com aço Hadfield permite observar que os cavacos são predominantemente descontínuos para todos os tamanhos de abrasivo ensaiados, mas com a presença de cavacos contínuos. Durante a inspeção visual observa-se que a quantidade de partículas contínuas diminui com aumento do tamanho do abrasivo. O EDS realizado permite verificar que os cavacos são provenientes da amostra de aço Hadfield. É importante salientar que o aço Hadfield com microestrutura inicialmente austenítica pode formar *debris* com estruturas martensítica, mais quebradiças e magnéticas, e também possivelmente também com estruturas austeníticas com características dúcteis, menos quebradiças e não magnéticas. Porém, as partículas de desgaste austeníticas não foram coletadas pelo dispositivo magnético. Não foi possível colher partículas de desgaste por meio de inspeção visual das areias empregadas nos ensaios. Ou seja, não se detectaram eventuais *debris* de desgaste de aço Hadfield que não foram aprisionados no imã. A estrutura dos *debris* deve ser objeto de estudo mais aprofundado pois não há consenso de que se formem estruturas martensíticas no desgaste de Hadfield.

Segundo Swanson e Klann (1981) partículas de desgaste descontínuas, observadas para o aço Hadfield, se formam após contatos repetitivos com a partícula abrasiva, devido a repetidas deformações plásticas do material exposto nas bordas dos sulcos de desgaste, sendo que esse fenômeno já foi relatado em estudos sobre abrasão utilizando o ensaio roda de borracha. Por outro lado, essa afirmação é controversa, tendo em vista que cavacos descontínuos podem ocorrer em operações de corte, como por exemplo na usinagem, sendo o cavaco dependente dos parâmetros de usinagem e do material usinado (FERRARESI 1977).

Após a análise das superfícies de desgaste e das partículas de desgaste não é possível afirmar qual o mecanismos de desgaste predominante, sendo que a análise da superfície de desgaste e das partículas de desgaste não permite realizar essa afirmação. É possível apenas elucidar a presença de dois micromecanismos de desgaste, sendo eles o microsulcamento e o microcorte.

5.2.5. Perfilometria

Na Figura 42 são apresentados os resultados de perfilometria para o parâmetro Sz, realizados na superfície de desgaste do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios realizado com valor de pH 5,5. Os resultados apresentados foram obtidas por meio da média de três medições.

Figura 42 – Sz em função do tamanho do abrasivo para o aço H-13 e aço Hadfield para ensaios realizados com pH 5,5.

Os resultados apresentados na Figura 42 mostram que o parâmetro Sz aumenta com o aumento do tamanho do abrasivo para os dois materiais, sendo que para o aço H-13, o valor de Sz foi maior para todos os tamanhos de abrasivo quando comparado com o aço Hadfield. Não foi possível correlacionar os resultados obtidos do parâmetro Sz com o TCA.

Na Figura 43 são apresentados os resultados de perfilometria para o parâmetro Sz, realizados na superfície de desgaste do aço Hadfield para o menor tamanho de abrasivo, N100 (0,15 – 0,30 mm) em ensaios com valores de pH 5,5 , 7,0 e 12,8. Os resultados apresentados foram obtidas por meio da média de três medições.

Figura 43 - Sz em função do pH da solução para os ensaios realizados com aço Hadfield e tamanho do abrasivo #100 (0,15 – 0,30 mm).

É possível observar na Figura 43 que foram obtidas menores penetrações com aumento do pH da solução, ou seja, para o maior valor de pH ensaiado, de 12,8, foi obtida a menor profundidade de penetração. Entretanto não houve diferença na dureza máxima medida (Figura 34) com a variação do pH.

5.2.6. Caracterização do abrasivo após ensaio

Após os ensaios realizados com aço Hadfield utilizando o menor tamanho de abrasivo, N100 (0,15 – 0,30 mm) e com valores de pH 5,5 , 7,0 e 12,8, foram retiradas amostras da areia após utilização e submetidas a caracterização de tamanho e forma utilizando equipamento CAMSIZER, com os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Tamanho e forma após ensaios com aço Hadfield utilizando abrasivo de tamanho #100 (0,15 – 0,30 mm) em função valor do pH da solução.

pH do ensaio	Tamanho do abrasivo		Forma	
	média [mm]	desvio	Esfericidade (SPHT)	b/l
Antes do ensaio	0,204	0,071	0,798	0,702
5,4 – 5,6	0,209	0,086	0,797	0,703
7,0 – 7,2	0,204	0,079	0,797	0,704
12,7 – 12,9	0,201	0,098	0,797	0,705

Analisando os resultados apresentados na Tabela 7 é possível verificar que não ocorreram variações do tamanho médio e de forma do abrasivo após os ensaios, para nenhum dos valores de pH das soluções utilizadas.

5.2.7. Análise química da solução aquosa

Após os ensaios realizados com aço Hadfield utilizando o menor tamanho de abrasivo, N100 (0,15 – 0,30 mm) e com valores de pH 5,5 , 7,0 e 12,8, foram retiradas amostras das soluções aquosas e as mesmas foram analisadas via espectrometria de plasma, permitindo assim conhecer o teor de Ferro, em miligramas por litro, e de Silício presentes nas soluções. Os resultados são apresentados na Tabela 8, sendo

possível observar que o teor de Silício não variou com o pH inicial da solução e que o teor de Ferro para os valores iniciais de pH 5,5 e 7,0 foram iguais, apresentando maior valor para o pH inicial de 12,8.,

Tabela 8 – Análise química por espectrometria de plasma das soluções aquosas após ensaios com aço Hadfield para o menor tamanho de abrasivo em função do pH inicial da solução.

Areia	pH	Ferro [mg/L]	Silício [%]
#100 (0,15 - 0,30 mm)	5,4 - 5,6	97,5 ± 7,1	0,14 ± 0,02
	7,0 - 7,2	95,0 ± 9,9	0,11 ± 0,01
	12,7 - 12,8	123,7 ± 1,6	0,12 ± 0,01

Como não ocorreram alterações de tamanho e forma dos abrasivos analisados após os ensaios com o menor tamanho de abrasivo, bem como não foram observadas variações no teor de silício nas soluções após os ensaios, sugere-se a hipótese de que as menores profundidades (Sz) e menores valores de perda de massa observadas com aumento do valor do pH da solução são, provavelmente, devido ao sinergismo abrasão-corrosão, em que o produto da corrosão formado com menores valores de pH são mais facilmente removidos e penetrados pelos abrasivos quando comparados com maiores valores de pH.

5.2.8. Comportamento do pH do meio

Medições de pH ao término dos ensaios foram realizadas e os resultados são apresentados na Figura 44 em função do tamanho do abrasivo para os ensaios realizados com aço H-13 e com aço Hadfield.

Figura 44 - Variação do pH ao término do ensaio em função do tamanho do abrasivo para os ensaios realizados com aço H-13 e aço Hadfield.

Por meio dos resultados apresentados na Figura 42 é possível notar que para todos os tamanhos de abrasivo o comportamento da variação do pH do meio é similar. Para os valores de pH inicial do meio de 7,0 e 12,8, a variação em relação ao pH após o ensaio é pequena para todos os tamanhos de abrasivo. Por outro lado, para o pH inicial de 5,5, ocorre uma variação considerável do pH ao término do ensaio, aumentando para em torno de 7,0.

Para de verificar se a variação do pH do meio se dava devido à adição da areia, ensaios no abrasômetro roda de borracha foram realizados sem submeter corpos de prova ao desgaste, apenas promovendo a agitação da mistura abrasiva. Para estes ensaios foram utilizadas as mesmas quantidades de abrasivo e solução aquosa e o mesmo período de tempo utilizado nos ensaios de abrasão. Ao final dos ensaios o pH do meio foi medido e os resultados são apresentados na Figura 45. Nota-se que o comportamento da variação do pH foi o mesmo para os ensaios sem corpo de prova e para os ensaios de abrasão com corpo de prova submetido ao desgaste. Para os valores de pH iniciais do meio de 7,0 e 12,8, o pH do meio ao final do ensaio não sofreu variações consideráveis, e para o pH inicial do meio de 5,5 o pH final do meio variou para em torno de 7,0.

Figura 45 - Variação do pH final em função do tamanho do abrasivo para ensaios no equipamento roda de borracha sem corpo de prova. Algumas barras de erros não estão visíveis devido ao pequeno desvio padrão.

Os resultados apresentados na Figura 45 não permitem assumir que a variação do pH inicial do meio varia de 5,5 para em torno de 7,0 ocorre apenas devido a adição de areia na solução aquosa. Sendo assim, foram realizados ensaios em um recipiente de vidro adicionando as mesmas quantidades de abrasivo e de solução aquosa utilizadas nos ensaios de abrasão. As misturas foram agitadas utilizando bastão de vidro durante 10 minutos e por fim o pH do meio foi medido. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 46, e mostram que assim como nos ensaios de abrasão pH após o ensaio não sofre variações consideráveis para os valores de pH de 7,0 e 12,8. Já para o pH inicial do meio de 5,5 o pH final aumenta para em torno de 7,0.

Figura 46 - Variação do pH em função do tamanho do abrasivo para ensaios em recipiente de vidro. Algumas barras de erros não estão visíveis devido ao pequeno desvio padrão.

Para se determinar como ocorre a mudança de pH em função do tempo nos ensaios com pH inicial de 5,5, foram feitas medidas de pH em ensaios sem corpo de prova para tempos de 1, 3 e 5 minutos, para todos os tamanhos de abrasivo e para os três valores de pH estudados. Os resultados são mostrados na Figura 47.

(a)

(b)

(c)

Figura 47 - Comportamento do pH em função do tempo para ensaios em roda de borracha sem corpo de prova: (a) pH inicial de 5,50 ; (b) pH inicial 7,0 ; (c) pH inicial de 12,8.

O resultados apresentados na Figura 47 mostram que para os meios com valores iniciais de pH de 7,0 e 12,8, o pH permanece praticamente constante durante todo o ensaio para todos os tamanhos de abrasivos. Para os meios com pH inicial de 5,5 o pH aumentou no primeiro minuto de ensaio para aproximadamente 7,0, permanecendo constante durante o restante do ensaio para todos os tamanho de abrasivo.

Os resultados apresentados de variação do pH em função do tempo de ensaio

permitem observar que os ensaios realizados com pH inicial do meio de 5,5 ocorre durante 9 minutos com o mesmo valor de pH, em torno de 7,0. Comparando esses resultados com o valores de perda de massa obtidos é válido levantar a hipótese de que o primeiro minuto de ensaio pode ser responsável por esta diferença de perda de massa entre os ensaios realizados com valor inicial de pH de 5,5 e 7,0.

Para testar a hipótese, amostras de aço H-13 e aço Hadfield foram submetidas a ensaios de abrasão nas mesmas condições, porém com duração de 1 minuto. Os resultados de perda de massa média em função do tamanho do abrasivo e do pH da solução são apresentados na Figura 48, obtidos por meio de duas repetições por condição.

(a)

(b)

Figura 48 - Perda de massa em função do tamanho do abrasivo e do pH inicial para ensaios com duração de 1 minuto: (a) aço H-13; (b) aço Hadfield.

Os resultados obtidos para os ensaios com duração de 1 minuto permitem descartar a hipótese de que o primeiro minuto de ensaio é responsável pela diferença de perda de massa dos ensaios realizados com duração de 10 minutos com pH inicial de 5,5 e 7,0, pois os resultados obtidos para 1 minuto foram idênticos, exceto para o maior tamanho de abrasivo. Observa-se que o efeito da variação do pH é mais pronunciado para o maior tamanho de abrasivo, contraponto aos resultados apresentados por Roveri e Chaves (2011) e aos resultados apresentados nos ensaios com 10 minutos, em que o aumento da severidade do desgaste reduz o efeito relativo do pH.

Com o descarte de que os eventos que ocorrem no primeiro minuto de ensaio são os responsáveis pela diferença de perda de massa entre os ensaios com pH 5,5 e 7,0, outro fator relevante e que apresenta a maior diferença entre as duas soluções, é a forma com que as soluções foram obtidas, ou seja, a solução inicial de pH 5,5 que passa a ter um valor de pH 7,0 teve o pH alterado devido a adição de areia, já a solução com pH inicial de 7,0 foi obtida adicionando NaOH em água deionizada, permanecendo com este pH com a adição de areia.

Sendo assim, ensaios de abrasão foram realizados estabilizando o meio com solução aquosa de pH inicial 5,5 durante 1 minuto até atingir o valor 7,0. Após estabilizado o valor de pH em 7,0 o ensaio foi iniciado submetendo o corpo de prova ao desgaste abrasivo. Para este ensaio apenas o aço H-13 foi submetido ao desgaste utilizando tamanho de abrasivo de #50 (0,30 a 0,60 mm). Três ensaios foram realizados e a perda de massa média é apresentada na Figura 49 em conjunto com o resultados anteriores para valores iniciais de pH 5,5 e 7,0.

Figura 49 - Perda de massa para ensaios realizados com pH inicial de 5,5, 7,0 e para pH 7,0 obtido por meio da estabilização do pH 5,5.

Observa-se nos resultados apresentados na Figura 49 que existe uma diferença significativa entre a perda de massa obtida no ensaio realizado com pH 7,0 obtido por meio da estabilização da solução de pH 5,5 e areia quando comparada às condições iniciais propostas no trabalho do pH inicial de 5,5 e pH de 7,0 obtido por meio da adição de NaOH em água deionizada. Os resultados encontrados sugerem que durante o primeiro minuto de ensaio com pH inicial da solução de 5,5 ocorre consumo de parte do agente corrosivo, reduzindo assim a potencialidade de ataque ao corpo de prova. Essa hipótese será investigada utilizando solução tampão (Item 5.3).

5.2.9. Ensaaios ao longo do tempo

Retomando os resultados apresentados anteriormente de perda de massa em função do tamanho do abrasivo para as durações de ensaio de 1 e 10 minutos, observa-se que o comportamento da perda de massa é variável ao longo do ensaio, tendo regiões com maior ou menor intensidade de desgaste. Tendo em vista a variação em questão, ensaios com duração de 5 minutos foram realizados e os resultados para o aço H-13 e para o aço Hadfield são apresentados na Figura 50 e na Figura 51, respectivamente.

Figura 50 – Perda de massa do aço H-13 em função do tempo de ensaio para pH inicial de 5,5 e para o tamanhos de abrasivo: (a) #50 (0,30 a 0,60 mm) ; (b) #16 (1,20 a 2,40 mm).

Figura 51 – Perda de massa do aço Hadfield em função do tempo de ensaio para pH inicial de 5,5 e para o tamanhos de abrasivo: (a) #50 (0,30 a 0,60 mm) ; (b) #16 (1,20 a 2,40 mm) .

Os resultados apresentados para o comportamento da perda de massa em relação ao tempo de ensaio para o aço H-13 e para o aço Hadfield foram bastante similares. Para o tamanho de abrasivo #50 (0,30 a 0,60 mm) não existe diferença de comportamento da taxa de desgaste nos intervalos de tempo estudados para o aço H-13. Por outro lado, para o aço Hadfield existe uma região inicial onde a intensidade de desgaste é ligeiramente menor do que a taxa de desgaste na região final, confirmado pelos valores de perda de massa e pelo fato da reta de tendência cruzar o eixo horizontal. Ou seja, o processo abrasivo desgastou menos o material na primeira fração de tempo de ensaio, quando comparado com as frações seguintes.

Por outro lado, para os ensaios com maior tamanho de abrasivo para os aços H-13 e Hadfield, o comportamento inicial foi invertido, com esta região apresentando uma maior intensidade de desgaste do que quando comparada à região final.

O comportamento diferenciado de perda de massa em função do tempo para os dois tamanhos de abrasivo pode ser explicado devido ao endurecimento da superfície dos materiais antes e após os ensaios. Quanto mais dura for a superfície do mesmo

material, maior será a dificuldade do abrasivo desgastá-la.

Para a condição com tamanho de abrasivo de #50 (0,30 a 0,60 mm), a microdureza da superfície após o desgaste do aço H-13 é de 587 HV_{0,3} enquanto a microdureza inicial da superfície é de 588 HV_{0,3}, ou seja, a dureza inicial da superfície é a mesma da superfície após o desgaste, o que justificada a ausência de variação de intensidade de desgaste entre o início e o fim do ensaio.

Para o aço Hadfield nas condições de ensaios com tamanho de abrasivo de #50 (0,30 a 0,60 mm), a microdureza final da superfície é de 557 HV_{0,3}, enquanto a dureza inicial da superfície apresenta um valor mais elevado, de 712 HV_{0,3}, o que justifica a maior dificuldade de desgastar o material no início do ensaio (1 minuto) quando comparado com a etapa final de ensaio (10 minutos).

Para as condições com tamanho de abrasivo de #16 (1,20 a 2,40 mm), os aços H-13 e Hadfield apresentaram o mesmo comportamento, sendo que a microdureza da superfície desgastada é maior do que a da superfície inicial. Para o aço H-13 a microdureza inicial obtida foi de 588 HV_{0,3} e microdureza final de 632 HV_{0,3}. Para o aço Hadfield, a microdureza inicial obtida foi de 712 HV_{0,3} e a microdureza final de 733 HV_{0,3}, o que justifica uma maior intensidade de desgaste inicial comparada a intensidade de desgaste final.

5.3. Segunda série de ensaios – Ensaio com solução tampão – pH 5,5

Após a constatação de que os ensaios realizados utilizando pH inicial da solução com valor de 5,5 variava para um valor de pH de aproximadamente 7,0, passou a ser interessante conhecer o comportamento dos materiais utilizando solução com pH constante no valor de 5,5. Visando garantir que o pH da solução não sofresse alterações ao longo do ensaio foi então utilizada uma solução tampão, obtida utilizando água deionizada (pH 5,5), hidróxido de sódio e ácido acético.

Como esta nova série de ensaios foi realizada após um período de tempo em relação a primeira série de ensaios, onde o equipamento foi utilizado para a realização de outros ensaios não relacionados a esta dissertação, foi necessário a substituição dos rolamentos do equipamento. Com a alteração de componentes do equipamento, novos ensaios com as mesmas condições da primeira série de ensaios foram realizados,

sendo que ficou constatado que ocorreu uma variação considerável dos resultados, sendo necessário realizar novos ensaios com o material de referência, o aço H-13, possibilitando comparar com os novos resultados obtidos anteriormente.

Na Figura 52 são apresentados os resultados obtidos de perda de massa do aço H-13 em função do tamanho do abrasivo e do pH da solução, sendo eles pH 5,5 obtido apenas com água deionizada e com pH 5,5 obtido por meio da solução tampão. Todos os resultados foram obtidos na segunda série de ensaios.

Figura 52 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5 obtido com água deionizada e com solução tampão na segunda série de ensaios.

O comportamento observado na Figura 52 é similar ao apresentado para os resultados da primeira série de ensaios, com relação ao tamanho do abrasivo, sendo que o aumento do tamanho do abrasivo resulta em aumento da perda de massa. Com relação a solução, verificou-se que a perda de massa nos ensaios com solução tampão é maior que as perdas de massa obtidas nos ensaios com pH inicial 5,5.

Na Tabela 9 são apresentados os valores apresentados na Figura 52, sendo possível observar a diferença percentual entre os valores para cada tamanho de

abrasivo em função da variação da solução utilizada.

Tabela 9 – Perda de massa do aço H-13 e diferença percentual para cada tamanho de abrasivo em função da variação da solução utilizada.

	Aço H-13		
	Perda de Massa [g]		
Tamanho do abrasivo	pH 5,5 Água Deionizada	pH 5,5 Solução tampão	Diferença [%]
#100 (0,15 - 0,30 mm)	0,143 ± 0,009	0,168 ± 0,016	14,6
#50 (0,30 - 0,60 mm)	0,428 ± 0,041	0,514 ± 0,066	16,7
#30 (0,60 - 1,20 mm)	0,555 ± 0,024	0,659 ± 0,036	15,7
#16 (1,20 - 2,40 mm)	0,704 ± 0,27	0,940 ± 0,023	25,1

Ao contrario dos resultados apresentados na primeira série de ensaios, onde a variação do pH do meio foi menos significativa na perda de massa para o maior tamanho de abrasivo os resultados apresentados na Tabela 9 mostram que a variação do meio apresentou maior influência para o maior tamanho de abrasivo.

Com a realização de ensaios do aço H-13, que se trata de um material de referência, utilizando pH 5,5 obtido com água deionizada em ambas séries torna-se possível obter a perda de massa relativa do aço Hadfield sem que se realize ensaios na nova condição do equipamento, considerando que a diferença entre a perda de massa dos materiais para cada tamanho de abrasivo será a mesma em ambas as séries. Na literatura existem trabalhos que empregam materiais de referência, especialmente quando são estudadas varias ligas, para hierarquizar a resistência ao desgaste em função desse material ou para permitir comparações futuras ou comparações entre equipamentos. Por exemplo, Guesser (1989) avaliou a resistência ao desgaste de diversos materiais, atribuindo um índice de desgaste igual a 100 à liga de referência, sendo então o desgaste de uma outra liga determinado pela relação entre a sua taxa de desgaste e da liga de referência.

Na Figura 53 são apresentados os resultados obtidos de perda de massa do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo e do pH da solução, sendo elas pH 5,5 obtida apenas com água deionizada com a perda de massa calculada utilizando o material de referência e com pH 5,5 obtido por meio da solução tampão sendo que a perda de massa foi obtida por meio de realização de ensaios.

Figura 53 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5 obtido com água deionizada e com solução tampão.

Tabela 10 - Perda de massa do aço Hadfield e diferença percentual para cada tamanho de abrasivo em função da variação da solução utilizada.

	Aço Hadfield		
	Perda de Massa Média [g]		
Tamanho do abrasivo	pH 5,5 Agua Deionizada	pH 5,5 Solução tampão	Diferença [%]
#100 (0,15 - 0,30 mm)	0,088 ± 0,005	0,139 ± 0,006	37,0
#50 (0,30 - 0,60 mm)	0,361 ± 0,034	0,410 ± 0,021	11,9
#30 (0,60 - 1,20 mm)	0,429 ± 0,014	0,473 ± 0,008	9,2
#16 (1,20 - 2,40 mm)	0,477 ± 0,014	0,592 ± 0,046	19,5

Observa-se na Figura 53 que a perda de massa aumenta com aumento do tamanho do abrasivo e que a perda de massa para os ensaios com solução tampão com pH 5,5 foi maior do que a perda de massa com água deionizada com pH 5,5.

Na Figura 54 é apresentada a comparação entre a perda de massa do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo utilizando água deionizada com pH 5,5, sendo que a perda de massa do aço Hadfield foi calculada, como explicado anteriormente.

Figura 54 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com pH 5,5 obtido com água deionizada.

Na Figura 54 é possível observar que o aço Hadfield apresentou maior resistência ao desgaste para todos tamanhos de abrasivo. Assim como na primeira série de ensaios é possível postular a existência de um TCA, na faixa de tamanho de abrasivo #50 (0,30 – 0,60 mm).

Na Figura 55 é apresentada a comparação entre a perda de massa do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo utilizando solução tampão com pH 5,5.

Figura 55 – Comparação entre a perda de massa média (3 repetições) do aço H-13 e do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para ensaios com solução tampão com pH 5,5.

Na Figura 55 também é possível observar que o aço Hadfield apresentou maior resistência ao desgaste para todos tamanhos de abrasivo. Assim como na primeira série de ensaios é possível postular a existência de um TCA, na faixa de tamanho de abrasivo #50 (0,30 – 0,60 mm).

Para verificar a confiabilidade dos resultados de perda de massa obtidos para o aço Hadfield utilizando os cálculos realizados com base nos resultados do material de referência, foram realizados ensaios utilizando água deionizada com pH 5,5 e areia com tamanho #100 (0,15 – 0,30 mm) e #16 (1,2 – 2,4 mm), permitindo assim a comparação entre os resultados calculados e os resultados experimentais, que estão apresentados na Figura 56.

Figura 56 – Comparação de resultados obtidos para o aço Hadfield de perda de massa obtidas por meio de cálculos utilizando material de referência e obtida por ensaio utilizando água deionizada com pH 5,5 e tamanho de abrasivo de #100 e #16.

Para os resultados apresentados na Figura 56 é possível observar que para o menor e para o maior tamanho de abrasivo a perda de massa calculada e obtida por ensaios não sofreu variações consideráveis, mostrando assim a importância de sempre utilizar materiais de referência, permitindo comparações após manutenções nos equipamentos e comparações entre equipamento e laboratórios de pesquisa.

Na Figura 57 são apresentadas as imagens das superfícies de desgaste obtidas utilizando MEV, para os ensaios realizados com aço Hadfield e solução tampão com pH 5,5.

(a)

(b)

(c)

Figura 57 – MEV da superfície de desgaste do aço Hadfield em ensaios realizados com solução tampão com pH 5,5 , em destaque pontos de corrosão, com tamanho de abrasivo: (a) #50 (0,30 – 0,60 mm) ; (b) e (c) #16 (1,20 – 2,40 mm).

Analisando as superfícies de desgaste apresentadas na Figura 57 é possível observar a presença de pontos de corrosão, fenômeno não visualizado na primeira série de ensaios para nenhuma das condições impostas. Esses pontos de corrosão devem-se ao fato de o pH da solução permanecer ácido (5,5) durante todo o ensaio, facilitando assim o ataque corrosivo da superfície desgastada, sendo assim uma explicação para as maiores perdas de massa obtidas nos ensaios utilizando solução tampão quando comparada com os ensaios utilizando água deionizada.

Os resultados da primeira série de ensaios e da segunda série de ensaios para o aço Hadfield são apresentados na Figura 58, sendo que a perda de massa utilizando solução tampão foi ajustada mediante obtenção da perda de massa relativa em relação ao material de referencia, o aço H-13, que foi ensaiado nas duas condições do equipamento.

Figura 58 – Perda de massa do aço Hadfield em função do tamanho do abrasivo para as duas séries de ensaios, com a perda de massa para o pH 5,5 tampão sendo ajustada.

Comparando os resultados apresentados Figura 58 para um mesmo tamanho de abrasivo, a perda de massa quando utilizada solução com pH 5,5 obtido por solução tampão, foi, em ordem crescente de tamanho de abrasivo, de 1,6, 1,1, 1,1 e 1,2 vezes maior quando comparada com perda de massa dos ensaios com pH 5,5 obtido

utilizando água deionizada e de 3,1 , 1,6 , 1,4 e 1,5 vezes maior do que a perda de massa dos ensaios realizado com pH 12,8. Assim como obtido na primeira série de ensaios a maior diferença de perda de massa em função da variação do pH ocorreu para o menor tamanho de abrasivo N100 (0,15 – 0,30 mm).

Os resultados obtidos nas duas séries de ensaios, permitiram verificar em quais condições de pH do meio e de tamanho de abrasivo o aço Hadfield apresentou o mínimo desgaste dentre as condições ensaiadas. Menores valores de perda de massa foram obtidas para menores tamanhos de abrasivo e maiores valores de pH. Com relação ao efeito do pH foi possível associar este ao parâmetro Sz. Com relação ao tamanho do abrasivo ensaiado foi possível notar a presença de um TCA para os dois materiais ensaiados. Foi verificado que a microdureza após o ensaios do aço Hadfield variou com aumento do tamanho do abrasivo, em uma relação linear crescente, não observado para o aço H-13.

6. Conclusões

Nas condições experimentais do trabalho (abrasivo solto com tamanho entre 0,15 e 2,4 mm, pH do meio com valores entre 5,5 e 12,8, carga aplicada de 130 N e utilizando aço Hadfield Classe C e aço H-13) os principais resultados e conclusões são:

O aumento do tamanho dos abrasivos e a diminuição do pH causaram aumento nas perdas por abrasão para o aço Hadfield e para o aço H-13.

O efeito do tamanho do abrasivo na perda de massa dos materiais em estudo indica que a perda de massa aumenta linearmente até um TCA, e após este tamanho de abrasivo a perda de massa continuou a aumentar, mas com menor intensidade. Esse resultado é semelhante ao observado nos estudos com abrasivo fixo. Após o TCA foram observadas partículas abrasivas incrustadas na superfície de desgaste que atuaram como barreiras para o desgaste, causando acúmulo localizado de material desgastado posteriormente. Não foi possível relacionar o fenômeno do TCA com a mudança do micromecanismo de desgaste e com a morfologia dos cavacos. Em ambos os materiais foram observados os micromecanismos de micro corte e de micro sulcamento.

A maior resistência ao desgaste, em todas condições testadas, do aço Hadfield em comparação com aço H-13 foi relacionada a maior capacidade de encruamento, em função da deformação devido ao processo abrasivo, do aço Hadfield em comparação ao aço H-13.

A redução do pH do meio resultou em aumento da perda de massa e aumento da profundidade de penetração, S_z , para os dois materiais em todos tamanhos de abrasivos utilizados, como fruto, provavelmente, do sinergismo abrasão-corrosão.

Menores tamanhos de abrasivo resultaram em maior efeito relativo da diminuição do pH no aumento da perda de massa para o aço Hadfield. Os resultados para o aço H-13 foram contraditórios, com o uso da solução com pH 5,5 obtida com água deionizada o efeito do pH foi maior para os menores tamanhos de abrasivo. Com o uso da solução tampão com pH 5,5 esse efeito se inverteu, sendo maior o efeito do

pH para os maiores tamanhos de abrasivo.

Para as condições com valores de pH inicial iguais a perda de massa obtida foi maior para a solução tampão que não sofreu variação ao longo do ensaios, sendo observados diversos pontos de corrosão, não visualizados para a solução que sofre alteração de pH ao longo do ensaio, variando de 5,5 para aproximadamente 7, devido a adição de areia na solução aquosa. Esse resultado sugere que o modo de obtenção de um determinado pH é importante para a magnitude do seu efeito.

O procedimento experimental de medir o pH ao longo do ensaio adotado nesse trabalho é mais adequado do que o procedimento empregado em toda a literatura consultada que consiste em medir o pH no início dos ensaios, uma vez que ocorreu variação do pH nos ensaios com pH mais ácido.

A prática de seleção de materiais para bolas de moinho nas mineradoras já considera as variações de pH. Em operações de moagem nas quais o pH é baixo (~3) empregam-se bolas de moinho de ferro fundido de alto cromo com teores de cromo na faixa dos 27%. Quando o pH é maior (~10) os teores especificados de cromo são menores em torno de 18%. Nesse mestrado evidenciou-se que o pH tem efeito expressivo na resistência a abrasão do aço Hadfield. Ressalta-se que não há especificação diferenciada de composição química do aço Hadfield para considerar aplicações com distintos pH e nem parece haver prática industrial neste sentido. Sugere-se, portanto que a análise da aplicação desse importante material resistente ao desgaste considere esse fator. Caso as aplicações com pH ácido sejam significativas pode ser tecnicamente e economicamente interessante o desenvolvimento de variantes de aço Hadfield compatíveis com as solicitações.

7. Sugestões para trabalhos futuros

Alguns aspectos do trabalho requerem análises mais detalhadas pelo potencial que tem. Outros por não terem sido adequadamente tratados no tempo de execução do mestrado. A estes, juntam-se outros pontos decorrentes de ideias surgidas no desenvolvimento do mestrado.

- 1) A maior resistência ao desgaste do aço Hadfield em relação ao aço H-13, mesmo quando sua dureza de encruamento é inferior, requer estudar o endurecimento do aço Hadfield em função do tempo, do tamanho do abrasivo e do pH, por meio de medições de micro dureza, microscopia eletrônica de alta resolução e difração de raio X, nas configurações roda de borracha e pino contra lixa.
- 2) A atração dos debris pelo imã requer que se estudem, os debris do aço Hadfield em função do tempo, do tamanho do abrasivo e do pH, por meio de medições de micro dureza, microscopia eletrônica de alta resolução e difração de raio X, nas configurações roda de borracha e pino contra lixa.
- 3) Para o aço H-13 na primeira série de experimentos, o efeito do pH foi mais intenso para o menor tamanho de abrasivo. Na segunda série o efeito do pH foi mais intenso para o maior tamanho de abrasivo. Essa aparente contradição requer um estudo mais detalhado do sinergismo corrosão desgaste para esse material.
- 4) A variação do pH das soluções com pH inicial 5,5 ao longo do tempo do ensaio não pode ser suficientemente explicada nesse trabalho. Sugere-se, portanto que o tema seja investigando possivelmente no âmbito do estudo do efeito do íon usado para estabelecer o pH na corrosão desgaste.
- 5) Realizar ensaios com tamanhos de abrasivo menores do que 0,15 mm, verificando se a tendência de comportamento do TCA continua a mesma ou sofre alterações;
- 6) Ensaiar o aço H-13 tratado termicamente para ter macrodureza similar a do aço Hadfield;
- 7) Realizar ensaios de abrasão a dois corpos, na configuração pino contra lixa, e

verificar se o TCA permanece o mesmo dos ensaios a três corpos;

- 8) Realizar ensaios em corpos de prova sem o encruamento propiciado pela preparação superficial inicial;

8. Referências bibliográficas

ABBASIA, M.; KHEIRANDISHB, S.; KHARRAZIB, Y.; HEJAZIB, J. **On the comparison of the abrasive wear behavior of aluminum alloyed and standard Hadfield steels.** Wear, v.268, 2010, p. 202-207.

ADLER, P.H.; OLSON, G.B.; OWEN, W.S. **Strain hardening of Hadfield manganese steel.** Metallurgical transactions, v. 17, 1986, p. 1725-1737.

ALLEN, C.; BALL, A. **The abrasive-corrosive wear of stainless steels.** Wear, v. 74 , 1981, p. 298 – 305.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook - properties and selection: irons, steels, and high performance alloys.** Estados Unidos da América: ASM International, 2005, v.1. 2521p.

ASTM A128 / A128M-93(2012), **Standard Specification for Steel Castings, Austenitic Manganese** , ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ATABAKI, M. M.; JAFARI, S.; ABDOLLAH, H. **Abrasive wear behavior of high chromium cast iron and Hadfield steel – A comparison.** Journal of iron and steel research , International, v. 19, 2012, p. 43 – 50.

AVIENT, W. E.; GODDARD, J.; WILMAN, H. **An experimental study of friction and wear during abrasion of metals.** Proceedings of the Royal Society of London Series A. Mathematical and Physical Sciences, 258, 1960, p.159-180.

AVERY, H. S. **Austenitic Manganese Steel.** American Blake Shoe Co. 1949.

AVERY, H. S. **Classification and precision of abrasion tests,** Proc. Int. Conf. on Wear of Materials, St. Louis, MO., 1977, ASME, New York, p. 148 - 157.

BHATTACHARYYA, S. **A friction and wear study of Hadfield manganese steel.** Wear, v. 9, 1966, p. 451-461.

BURWELL, J. T. **Survey of possible wear mechanisms.** Wear, v. I, 1958, p. 119 - 141.

CORONADO, J. J. **Efeito do tamanho do abrasivo no desgaste de metais.** Tese de Doutorado Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo, São Paulo. p. 168, 2010.

CORONADO, J.J.; SINATORA, A. **Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 1.** Wear, v. 271, 2011a, p. 1794-1803.

CORONADO, J.J.; SINATORA, A. **Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 2.** Wear, v. 271, 2011b, p. 1794-1803.

DAS, S. ; MONDAL, D. P. ; SAWLA, S. ; RAMAKRISHNAN, N. **Synergic effect of reinforcement and heat treatment on the two body abrasive wear of an Al-Si alloy under varying loads and abrasive sizes.** Wear, v. 264, 2008, p. 47-59.

DIESBURG, D. E.; BORIK, F. **Optimizing abrasion resistance and toughness in steels and irons for the mining industry.** Materials for the mining industry: Symposium : Vail, Colorado, 1974, p. 15 - 34.

EFREMENKO, V. G. ; SHIMIZU, K. ; NOGUCHI, T. ; EFREMENKO, A.V. ; CHABAK, Y. G. **Impact-abrasive-corrosion wear of Fe-based alloys: Influence of microstructure and chemical composition upon wear resistance.** Wear, v. 305, 2013, p. 155-165.

EYRE, T.S. **Wear characteristics of metals.** Tribology International 10, 1976, p. 203-212

EYRE , T. S. **Friction and wear mechanisms of metals.** In: II Seminário sobre Materiais Resistentes ao Desgaste, Uberlândia, 1991, ABM, ed 1991. Anais, p. 263-292.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1977, p. 752.

FONTANA, M.G. **Corrosion Engineering.** 3rd ed., New York, McGraw Hill, 1986.

GATES, J.D. **Two-body and three-body abrasion: a critical discussion.** Wear, v. 214, 1998, p. 139-146.

GANGOPADHYAY, A. K. ; MOORE, J. J. **The role of abrasion and corrosion in grinding media wear.** Wear, v.104, 1985, p. 49 – 64.

GOUSSELAND, P. **Mines, Metals and Materials.** Materials for the mining industry: Symposium : Vail, Colorado, 1974, p. 7 - 10.

GUESSER, W. L.; COSTA, P. H. C.; PIESKE, A. **Nióbio em ferros fundidos brancos ligados ao cromo para aplicações em desgaste abrasivo.** Metalurgia – ABM, Vol. 45, n. 381, 1989.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials.** London: Edward Arnold Publishers Ltd., 1992.

JOST, N.; SCHMIDT, I. **Friction-Induced martensitic transformation in austenitic manganese steels.** Wear, v. 111, 1986, p. 377 – 389.

MA, X.; LIU, R.; LI, D.Y. **Abrasive wear behavior of D2 tool steel with respect to load and sliding speed under dry sand/rubber wheel abrasion condition.** Wear, v. 241 , 2000, p. 79-85.

MISRA, A.; FINNIE, I. **On the size effect in abrasive and erosive wear.** Wear, v. 65, n. 3, 1981, p. 359-373.

MONDAL, D. P. ; DAS, S. ; JHA, A. K. ; YEGNESWARAN, A. H. **Abrasive wear of Al alloy–Al₂O₃ particle composite: a study on the combined effect of load and size of abrasive.** Wear, v. 223, 1998, p. 131–138.

MOORE, J.J. ; PEREZ, R. ; GANGOPADHYAY, A. ; EGGERT, J.F. ; Factors affecting wear in tumbling mills: influence of composition and microstructure. International Journal of Mineral Processing, n. 22, 1988, p. 131-343.

NATHAN, G.W.; JONES, J.D. **The empirical relationship between abrasive wear and applied conditions.** Wear, v. 9, 1966, p. 300–309.

NOEL, R. E. J.; BALL, A. **On the synergistic effects of abrasion and corrosion during wear.** Wear, v. 87, 1983, p. 351 – 361.

PINTAÚDE, G. **Estudo do regime transiente em desgaste abrasivo – Ensaio em britador de mandíbulas.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 142, 1998.

PINTAÚDE, G. **Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza.** Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 200, 2002.

POHL, M; AL-RUBAIE, K. S; SINATORA, A. **Effect Of The Work Hardening On The Two-Body Abrasive Wear Of Steels And White Cast Irons.** In: Nordic Symposium on Tribology, 1995. Nordic Symposium on Tribology. Upsala Suécia. v. 4. p. 197-205.

RABINOWICZ, E.; DUNN, L. A.; RUSSELL P. G. **A study of abrasive wear under three-body conditions.** Wear, v. 4, 1961, p. 345–355.

ROVERI, E.; CHAVES, A. P. **Mecanismos de desgaste de corpos moedores em moinhos de bolas.** Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 8, n. 4, p. 261-266, 2011.

SIN, H. SAKA, N. SUH, N. P. **Abrasive wear mechanism and the grit size effect.** Wear, v. 55, 1979, p.163–190.

SINGLETON, D. J.; BLICKENSDECKER, R. **Wear and Corrosion of 12 Alloys During Laboratory Milling of Phosphate Rock in Phosphoric Acid Waste Water.** Bureau of Mines Report of Investigations, RI 8919, 1985

SHIPWAY, P.H.; WIROJANUPATUMP, S. **The role of lubrication and corrosion in abrasion of materials in aqueous environments.** Tribology International, v.35, 2002, p. 661–667.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology.** Amsterdam: Elsevier, 1993, Tribology Series,24.

STEIGERWALD, R. F. **Corrosion Principles for the Mining Engineer.** Materials for the mining industry: Symposium. Vail, Colorado, 1974.

SWANSON, P. A.; KLANN, R.W. **Abrasive wear studies using the wet sand and dry sand rubber wheel tests.** Wear of Materials, 1981, ASME, New York 1981, p. 379–389.

TANAKA, D. K. **Exame de britador de mandíbula.** Documento técnico. Laboratório de Fenômenos de Superfície. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politecnica da Universidade de São Paulo, 2011, p. 30.

TORO, A.; SINATORA, A.; TANAKA, D.K.; TSCHIPTSCHIN, A.P. **Corrosion–erosion of nitrogen bearing martensitic stainless steels in seawater–quartz slurry.** Wear, v. 251, 2001, p. 1257-1264.

TOZETTI, K.D. ; ALBERTIN, E. ; SCANDIAN, C. . **Efeito da Carga e do Tamanho do Grão Abrasivo no Desgaste do Ferro Fundido Branco 19,9% Cromo e 2,9% Carbono.** 68th ABM International Annual Congress, 2013, Belo Horizonte. Anais do 68th ABM International Annual Congress. São Paulo: Editora da ABM, 2013, v. 1. p. 2927-2938.

TREZONA, R.I.; ALLSOPP, D.N.; HUTCHINGS, I.M. **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test.** Wear, v. 225, 1999, p. 205-214.

TYLCZAK, J. H. **Abrasive wear.** ASM Handbook, vol. 18. Friction, Lubrication and Wear Technology. ASM International, USA, 1992, p. 184-190.

VATAVUK, J.; GOLDENSTEIN, H. **Aços Hadfield contendo carbonetos de Nb e Ti.** II Encontro de tecnologia e utilização dos aços nacionais. Rio de Janeiro. 1987, p. 151 – 169.

VILLABÓN, L. R. **Construção e instrumentação de abrasômetro do tipo roda-de-borracha para o estudo do comportamento tribológico de aços.** Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005, p. 82.

ZUM GAHR, K.H. **Formation of wear debris by the abrasion of ductile metals.** Wear v. 74 , 1981, p. 353 – 373.

ZUM GAHR, K.H. **Microstructure and Wear of Materials.** Tribology Series 10, Elsevier, Amsterdam, 1987.

WIROJANUPATUMP, S.; SHIPWAY, P.H. **Abrasion of mild steel in wet and dry conditions with the rubber and steel wheel abrasion apparatus.** Wear v.239, 2000, p. 91–101.

Anexo A - Resultados dos ensaios de desgaste: Perda de massa e pH final

Na Tabela 11 são apresentados os resultados de perda de massa e do pH após o ensaios para o ensaios realizados na primeira série de ensaios utilizando o aço H-13.

Tabela 11 – Perda de massa e pH para os ensaios com aço H-13.

Areia	Perda de Massa (g)	Média Perda Massa (g)	Desvio Padrão	pH Inicial	pH Final
#100 (0,15 – 0,30 mm)	0,162	0,170	0,012	7,00 - 7,20	6,80
	0,183			7,00 - 7,20	6,80
	0,164			7,00 - 7,20	6,75
	0,295	0,247	0,042	5,40 - 5,60	6,50
	0,218			5,40 - 5,60	6,50
	0,229			5,40 - 5,60	6,28
	0,112	0,132	0,019	12,70 - 12,90	12,05
	0,133			12,70 - 12,90	11,93
	0,151			12,70 - 12,90	12,20
#50 (0,30 – 0,60 mm)	0,673	0,663	0,037	7,00 - 7,20	7,20
	0,622			7,00 - 7,20	7,20
	0,693			7,00 - 7,20	7,41
	0,830	0,810	0,020	5,40 - 5,60	6,90
	0,811			5,40 - 5,60	6,90
	0,790			5,40 - 5,60	7,35
	0,601	0,572	0,034	12,70 - 12,90	12,49
	0,581			12,70 - 12,90	12,42
	0,535			12,70 - 12,90	12,37
#30 (0,60 – 1,20 mm)	0,834	0,843	0,019	7,00 - 7,20	7,20
	0,830			7,00 - 7,20	6,90
	0,865			7,00 - 7,20	7,30
	0,888	0,910	0,019	5,40 - 5,60	7,51
	0,923			5,40 - 5,60	6,50
	0,920			5,40 - 5,60	7,48
	0,807	0,805	0,039	12,70 - 12,90	12,49
	0,766			12,70 - 12,90	12,50
	0,843			12,70 - 12,90	12,46
#16 (1,20 – 2,40 mm)	0,986	1,054	0,059	7,00 - 7,20	6,50
	1,084			7,00 - 7,20	7,35
	1,093			7,00 - 7,20	7,20
	1,211	1,160	0,045	5,40 - 5,60	7,55
	1,132			5,40 - 5,60	7,55
	1,136			5,40 - 5,60	7,20
	0,947	0,934	0,013	12,70 - 12,90	12,48
	0,934			12,70 - 12,90	12,48
	0,921			12,70 - 12,90	12,48

Na Tabela 12 são apresentados os valores de perda de massa e do pH da solução após os ensaios da primeira série utilizando o aço Hadfield.

Tabela 12 – Perda de massa e pH final para os ensaios com aço Hadfield da primeira série de ensaios.

Areia	Perda de Massa (g)	Média Perda Massa (g)	Desvio Padrão	pH Inicial	pH Final
#100 (0,15 – 0,30 mm)	0,15	0,143	0,017	7,00 - 7,20	7,60
	0,123			7,00 - 7,20	7,63
	0,155			7,00 - 7,20	7,74
	0,139	0,151	0,010	5,40 - 5,60	7,60
	0,156			5,40 - 5,60	7,54
	0,158			5,40 - 5,60	7,49
	0,089	0,077	0,011	12,70 - 12,90	12,43
	0,067			12,70 - 12,90	12,42
	0,076			12,70 - 12,90	12,42
#50 (0,30 – 0,60 mm)	0,618	0,618	0,035	7,00 - 7,20	7,89
	0,652			7,00 - 7,20	7,80
	0,583			7,00 - 7,20	7,72
	0,640	0,683	0,039	5,40 - 5,60	8,04
	0,693			5,40 - 5,60	7,91
	0,715			5,40 - 5,60	7,80
	0,516	0,482	0,051	12,70 - 12,90	12,30
	0,424			12,70 - 12,90	12,41
	0,507			12,70 - 12,90	12,40
#30 (0,60 – 1,20 mm)	0,66	0,665	0,028	7,00 - 7,20	7,76
	0,640			7,00 - 7,20	7,89
	0,695			7,00 - 7,20	7,80
	0,747	0,732	0,045	5,40 - 5,60	7,89
	0,767			5,40 - 5,60	7,60
	0,681			5,40 - 5,60	7,67
	0,584	0,578	0,006	12,70 - 12,90	12,51
	0,573			12,70 - 12,90	12,40
	0,577			12,70 - 12,90	12,50
#16 (1,20 – 2,40 mm)	0,711	0,733	0,022	7,00 - 7,20	7,25
	0,755			7,00 - 7,20	7,23
	0,734			7,00 - 7,20	7,20
	0,855	0,819	0,032	5,40 - 5,60	7,28
	0,795			5,40 - 5,60	7,49
	0,807			5,40 - 5,60	7,51
	0,664	0,681	0,016	12,70 - 12,90	12,46
	0,694			12,70 - 12,90	12,43
	0,686			12,70 - 12,90	12,40

Na Tabela 13 são apresentados os resultados de perda de massa do aço H-13 obtidos na segunda série de ensaios com valor de pH 5,5 obtido com água deionizada e com solução tampão.

Tabela 13 – Perda de massa do aço H-13 e pH final da segunda série de ensaios para o pH 5,5 obtido com água deionizada e com solução tampão.

Areia	Perda de Massa (g)	Média Perda Massa (g)	Desvio Padrão	pH Inicial	pH Final
#100 (0,15 – 0,30 mm)	0,156	0,168	0,016	5,4 – 5,6 - Solução Tampão	5,51
	0,186				5,53
	0,161				5,53
	0,153	0,143	0,009	5,40 - 5,60 – Água deionizada	6,50
	0,140				6,50
	0,136				6,28
#50 (0,30 – 0,60 mm)	0,464	0,514	0,066	5,4 – 5,6 - Solução Tampão	5,52
	0,490				5,52
	0,589				5,53
	0,471	0,428	0,041	5,40 - 5,60 – Água deionizada	6,90
	0,423				6,90
	0,390				7,35
#30 (0,60 – 1,20 mm)	0,680	0,659	0,036	5,4 – 5,6 - Solução Tampão	5,51
	0,617				5,53
	0,679				5,51
	0,581	0,555	0,024	5,40 - 5,60 – Água deionizada	7,51
	0,551				6,50
	0,534				7,48
#16 (1,20 – 2,40 mm)	0,954	0,940	0,023	5,4 – 5,6 - Solução Tampão	5,53
	0,953				5,55
	0,913				5,52
	0,674	0,704	0,027	5,40 - 5,60 – Água deionizada	7,55
	0,711				7,55
	0,727				7,20

Na Tabela 14 são apresentados os resultados de perda de massa do Aço Hadfield obtidos na segunda série de ensaios, para ensaios realizados com pH 5,5 obtido com solução tampão.

Tabela 14 – Perda de massa do aço Hadfield para segunda série de ensaios, sendo que a perda de massa utilizando pH 5,5 com água deionizada trata-se da perda de massa relativa.

Areia	Perda de Massa (g)	Média Perda Massa (g)	Desvio Padrão	pH Inicial	pH Final
#100 (0,15 – 0,30 mm)	0,144	0,139	0,006	5,4 – 5,6 - Solução Tampão	5,54
	0,140				5,48
	0,132				5,52
	0,094	0,088	0,005	5,40 - 5,60 – Água deionizada	6,70
	0,086				6,90
	0,083				6,78
#50 (0,30 – 0,60 mm)	0,390	0,410	0,021	5,4 – 5,6 - Solução Tampão	5,50
	0,432				5,47
	0,407				5,53
	0,397	0,361	0,034	5,40 - 5,60 – Água deionizada	7,20
	0,357				6,90
	0,329				7,15
#30 (0,60 – 1,20 mm)	0,470	0,473	0,008	5,4 – 5,6 - Solução Tampão	5,49
	0,482				5,53
	0,467				5,52
	0,415	0,429	0,014	5,40 - 5,60 – Água deionizada	7,42
	0,443				6,60
	0,430				7,20
#16 (1,20 – 2,40 mm)	0,631	0,592	0,046	5,4 – 5,6 - Solução Tampão	5,51
	0,603				5,50
	0,542				5,47
	0,476	0,477	0,014	5,40 - 5,60 – Água deionizada	7,50
	0,463				7,13
	0,491				6,98

Anexo B - Mecanismo de desgaste

Imagens das superfícies de desgastes do aço H-13 e do aço Hadfield obtidas em MEV são apresentadas da Figura 59 até a Figura 64.

(a)

(b)

Figura 59 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o tamanho de abrasivo de #100 (0,15 – 0,30 mm) e pH do meio de 5,5, com aumento de: (a) 100 x e (b) 400 x.

(a)

(b)

(c)

Figura 60 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o tamanho de abrasivo de #100 (0,15 – 0,30 mm) e pH do meio de 12,8 , com aumento de: (a) 100 x ; (b) 500 x ; (c) 1000 x.

(a)

(b)

(c)

Figura 61 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o tamanho de abrasivo de #50 (0,30 – 0,60 mm) e pH do meio de 5,5 , com aumento de: (a) 100 x ; (b) 250 x ; (c) 500 x.

(a)

(b)

(c)

Figura 62 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o tamanho de abrasivo de #50 (0,30 – 0,60 mm) e pH do meio de 12,8 , com aumento de: (a) 100 x ; (b) 500 x ; (c) 1000 x.

(a)

(b)

Figura 63 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o tamanho de abrasivo de #30 (0,60 – 1,20 mm) e pH do meio de 5,5 , com aumento de:
(a) 100 x ; (b) 250 x .

(a)

(b)

(c)

Figura 64 – MEV da superfície desgastada do aço Hadfield em ensaios com o tamanho de abrasivo de #16 (1,20 – 2,40 mm) e pH do meio de 5,5 , com aumento de: (a) 100 x ; (b) 250 x ; (c) 1000 x.

Anexo C - Partículas de desgaste

Imagens em MEV das partículas de desgaste obtidas após os ensaios são apresentadas da Figura 65 até a Figura 72.

(a)

(b)

(c)

Figura 65 – Cavacos da superfície desgastada do aço H-13 durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #100 (0,15 – 0,30 mm) e pH de 5,5 com aumento de: (a) 200 x ; (b) 1000 x ; (c) EDS ponto 1.

(a)

(b)

(c)

Figura 66 – Cavacos da superfície desgastada do aço H-13 durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #50 (0,30 – 0,60 mm) e pH de 5,5 com aumento de: (a) 50 x ; (b) 200 x ; (c) 1000 x.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 67 – Cavacos da superfície desgastada do aço H-13 durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #30 (0,60 – 1,20 mm) e pH de 5,5 com aumento de:
(a) 100 x ; (b) 400 x ; (c) 190 x ; (d) EDS do ponto 1.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 68 – Cavacos da superfície desgastada do aço H-13 durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #16 (1,20 – 2,40 mm) e pH de 5,5 com aumento de: (a) 30 x ; (b) 100 x ; (c) 400 x ; (d) EDS do ponto 1.

(a)

(b)

(c)

Figura 69 – Cavacos da superfície desgastada do aço Hadfield durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #100 (0,15 – 0,30 mm) e pH de 5,5 com aumento de: (a) 200 x ; (b) 1000 x ; (c) EDS do ponto 2.

(a)

(b)

Figura 70 – Cavacos da superfície desgastada do aço Hadfield durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #50 (0,30 – 0,60 mm) e pH de 5,5 com aumento de:
(a) 200 x ; (b) EDS do ponto 1 ; (c) 500 x .

(a)

(b)

(c)

Figura 71 – Cavacos da superfície desgastada do aço Hadfield durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #30 (0,60 – 1,20 mm) e pH de 5,5 com aumento de: (a) 200 x ; (b) EDS do ponto 1 ; (c) 500 x .

(a)

(b)

(c)

Figura 72 – Cavacos da superfície desgastada do aço Hadfield durante ensaio com o tamanho de abrasivo de #16 (1,20 – 2,40 mm) e pH de 5,5 com aumento de:
(a) 100 x ; (b) EDS do ponto 1 ; (c) EDS do ponto 1 .