

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DA SOLDAGEM NA TRIBOCORROSÃO EM JUNTAS DE MATERIAIS
SIMILARES E DISSIMILARES UTILIZANDO O AÇO HARDOX 500

por

André Marubin Fich

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2016



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

INFLUÊNCIA DA SOLDAGEM NA TRIBOCORROSÃO EM JUNTAS DE MATERIAIS
SIMILARES E DISSIMILARES UTILIZANDO O AÇO HARDOX 500
por

André Marubin Fich

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof^a. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Prof. Ney Francisco Ferreira

Prof. Tiago Becker

Porto Alegre, 18 de Novembro de 2016.

Fich, A. M. **Influência da soldagem na tribocorrosão em juntas de materiais similares e dissimilares utilizando o aço Hardox 500**. 2016. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

As tecnologias utilizadas na agricultura tem impacto direto na produtividade e devem evoluir para que se tornem mais eficientes vide à demanda crescente por alimentos. Levando isto em conta, este trabalho apresenta os resultados obtidos no estudo da influência do desgaste em meio aquoso do aço Hardox 500, soldado utilizando o processo arco submerso, por ser utilizado, por exemplo, em caçambas de caminhões na colheita de arroz. Dados foram gerados através de análises experimentais de macrografias, microdurezas, tribocorrosão e perfilometria de dois conjuntos de peças, um de materiais similares utilizando aço Hardox 500 e outro, de materiais dissimilares, utilizando o aço SAE 1010 juntamente com o metal Hardox 500. A soldagem modifica a dureza das amostras nas zonas afetadas pelo calor e no metal de solda, sendo que a zona afetada no Hardox 500 é bem maior que a do SAE 1010. O metal base SAE 1010 sofre maior corrosão, de forma generalizada e apresentando pites, em relação ao Hardox 500 sem revestimento e ao Hardox 500 com revestimento, sendo que o último apresenta maior resistência à corrosão devido a sua camada protetora. Considerando os resultados obtidos neste estudo, com as condições especificadas, a região da solda sempre apresentará comportamento inferior ao apresentado pelo aço Hardox 500, uma vez que sua camada protetora o protege do desgaste e corrosão. Já em um conjunto dissimilar, o aço SAE 1010 apresenta comportamento inferior em comparação ao restante do conjunto.

PALAVRAS-CHAVE: Hardox 500, tribocorrosão, soldagem por arco submerso, SAE 1010.

Fich, A. M. **Influence of welding on tribocorrosion in joints of similar and dissimilar materials using Hardox 500 steel**. 2016. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

The technologies used in agriculture have a direct impact on productivity and must evolve to become more efficient, given the growing demand for food. Taking this into account, this paper presents the results obtained in the study of the influence of the wear on aqueous environment of the Hardox 500 steel welded using the submerged arc process for being used for example, in truck bodies in the rice harvest. Data were generated through experimental analyzes of macrography, microhardness, tribocorrosion and profilometry of two sets of pieces, one of similar materials using Hardox 500 steel and another of dissimilar materials using SAE 1010 with Hardox 500 steel. Welding modifies the hardness of the samples on the heated-affected zones and on the welded metal; also, the heated-affected zone in the Hardox 500 is much larger than that of SAE 1010. The base metal SAE 1010 undergoes greater corrosion, generalized and presenting pits, in relation to the Hardox 500 without the protection layer and the Hardox 500 with this layer, the latter being more resistant to corrosion due to its protection layer. Considering the results obtained in this study, under the conditions specified, the welded region will always behave worse than that presented by Hardox 500 steel, since its primer protects it from wear and corrosion. Moreover, on the dissimilar joint, the SAE 1010 steel presents inferior behavior in comparison to the rest of the specimen.

KEYWORDS: Hardox 500, tribocorrosion, submerged arc welding, SAE 1010.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1 Soldagem por arco submerso	1
2.2 Tribocorrosão	1
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	3
3.1 Materiais utilizados e preparação das peças	3
3.2 Processo de soldagem	4
3.3 Preparação dos corpos de prova para as caracterizações e ensaio	4
3.4 Análise de macrografias	5
3.5 Análise de microdurezas	5
3.6 Análise de tribocorrosão	5
3.7 Análise de perfilometria	6
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
4.1 Macrografias.....	7
4.2 Microdurezas	7
4.3 Tribocorrosão	8
4.3.1 Metais base	8
4.3.2 Zonas afetadas pelo calor.....	10
4.3.3 Metais de solda.....	11
4.4 Perfilometria	12
4.4.1 Metais base	12
4.4.2 Zonas afetadas pelo calor.....	13
4.4.3 Metais de Solda	14
5. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE.....	16

1. INTRODUÇÃO

A agricultura é uma prática econômica que consiste no emprego de técnicas aplicadas no solo para o cultivo de vegetais a fim de garantir a alimentação humana e animal, além de produzir matérias-primas para outros setores e ornamentação. Nela existem três fatores de influência: o humano (mão de obra), o físico (clima e solo) e o econômico (valor da terra e nível de tecnologias aplicadas).

Esta atividade tem produtos originários de inúmeros tipos de processos, sendo que alguns utilizam meio úmido ou aquoso para sua produção. As tecnologias utilizadas tem impacto direto na produtividade e devem evoluir para que esta seja cada vez maior vide à demanda crescente por alimentos. Levando isto em conta, este trabalho visa analisar os resultados obtidos no estudo da influência do desgaste em meio aquoso do aço Hardox 500 soldado utilizando o processo arco submerso. Isso se torna relevante uma vez que este aço é utilizado, por exemplo, em caçambas de caminhões e conchas de retroscavadeiras na colheita de arroz, no qual é utilizada a soldagem como meio da união de materiais e apresenta um meio líquido corrosivo (ao aço) devido à plantação do arroz. Assim, gera-se um maior entendimento sobre a vida útil dos componentes soldados submetidos à desgaste em um meio aquoso.

Dessa maneira, o presente trabalho expõe os resultados obtidos através de análises de macrografias, microdurezas, tribocorrosão e perfilometria de dois conjuntos de peças unidas com o processo de soldagem por arco submerso, sendo o metal principal o aço Hardox 500 e o secundário o aço SAE 1010. Através da análise de tribocorrosão e perfilometria se entenderá o comportamento da região do metal de solda e da zona afetada pelo calor (região de menor dureza da junta soldada) em relação ao desgaste em meio líquido. Já as análises de microdurezas e macrografias visam avaliar a influência da soldagem nas microestruturas e propriedades mecânicas das juntas soldadas, de forma a auxiliar no entendimento dos seus comportamentos em tribocorrosão.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento em tribocorrosão de duas juntas soldadas; uma entre dois aços Hardox 500 e outra entre um aço Hardox 500 e um aço SAE 1010, comparando com os resultados apresentados pelos aços sem soldagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem por arco submerso

A soldagem por arco submerso, também conhecida por *submerged arc welding* (SAW), é um método de soldagem automático no qual o calor requerido para fundir o metal é gerado por um arco desenvolvido entre um arame sólido e as peças a serem unidas. A ponta do arame de soldagem, o arco elétrico e a peça são cobertos por um fluxo granuloso, que se funde parcialmente formando uma camada de escória, não havendo arco visível, nem faíscas, respingos ou fumos. Este processo tem como limitação as posições possíveis de soldagem, plana e horizontal em ângulo [Durer, 2011].

2.2 Tribocorrosão

De acordo com a norma ASTM G40-13, 2013, tribocorrosão é um processo que leva a uma transformação irreversível do material resultante de interações eletroquímicas, químicas e mecânicas simultâneas que ocorrem devido a um contato tribológico. Em outras palavras, a tribocorrosão leva à deterioração de materiais em contato por deslizamento ou rolamento em ambiente agressivo. Os testes deste tipo simulam situações reais em laboratório quanto ao desgaste em meio gasoso, líquido ou sólido, contendo, usualmente, quatro elementos: corpo sólido, contra corpo, elemento interfacial e ambiente. A origem da tribocorrosão, conforme Ponthiaux et alli, 2012, está relacionada com a presença de um filme passivo na superfície de materiais sujeitos ao desgaste e a modificações destas superfícies por fricção ou qualquer outra forma de carregamento mecânico.

Testes de tribocorrosão podem ser classificados em duas categorias, com base em suas finalidades, as quais são diferentes e complementares, nomeadamente testes fundamentais e tecnológicos. Os primeiros são utilizados em laboratórios de pesquisa e seu objetivo é identificar e compreender, sob condições bem definidas, os mecanismos básicos e sua sinergia que regem os fenômenos do ensaio. Já os testes tecnológicos, utilizados neste estudo, são projetados para reproduzir em laboratório as condições de situações reais ou para imitar condições particulares com a intenção de acelerar os processos de degradação do material. Estes últimos são amplamente utilizados para prever precisamente o comportamento de dispositivos mecânicos em condições reais de serviço e para melhorar a sua confiabilidade e durabilidade.

Este tipo de ensaio ocasiona principalmente desgaste e corrosão aos corpos envolvidos devido as suas características. Segundo Neale, 1973, o desgaste pode ser definido como o dano com perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido causado pela remoção ou alteração do material devido à ação mecânica, isto é, do contato e movimento relativo de um sólido, líquido ou gás contra uma superfície. De acordo com Mielczarski, 2015, é bastante comum que diferentes mecanismos de desgaste atuem simultaneamente, sendo este um fator significativo na difícil determinação de qual mecanismo está ocorrendo no processo. Ainda segundo o autor, tradicionalmente são aceitos quatro principais mecanismos de desgaste:

1. Desgaste adesivo: definido como a transferência de material de uma superfície para outra sob carga. A fratura deste ponto de união faz com que partículas de uma superfície fiquem aderidas na outra de maneira temporária ou permanente;
2. Desgaste abrasivo: provocado pela interação mecânica de partículas abrasivas ou protuberâncias duras que são forçadas contra uma superfície em deslizamento, sendo que o material com maior dureza provoca a remoção progressiva de material do outro com menor dureza. As partículas presas entre as duas superfícies deslizantes tem efeito de riscamento sobre elas e, como suportam parte da carga aplicada, tentam penetrar nas superfícies causando pontos concentradores de tensão;
3. Desgaste erosivo: causado pelo impacto de partículas sólidas ou de líquidos contra uma superfície de um objeto;
4. Desgaste fadiga: ocasionado pelo alto número de repetições do movimento sobre uma superfície.

Segundo Manhabosco (2009), a liberação de partículas metálicas por desgaste mecânico pode aumentar a taxa de corrosão. Também chamados de *debris*, estas partículas são geralmente formadas entre os corpos em contato e podem ser oriundas do desgaste de um ou ambos os materiais. Enquanto as partículas se mantêm em contato, experimentam quebra, corrosão, transferência e, finalmente, são ejetadas do contato quando atingem um tamanho crítico. De acordo com Mielczarski, 2015, elas apresentam comportamento abrasivo e aceleraram o desgaste ou agem como um sólido lubrificante, diminuindo o atrito e o desgaste, sendo suas propriedades físicas as responsáveis pelo modo como atuam no comportamento tribológico. A realização deste ensaio em metais passivos, os quais são recobertos por um filme de óxidos, pode ocasionar um drástico aumento da taxa de corrosão, uma vez que a abrasão mecânica causa um afinamento ou remoção localizada do filme protetor passivo expondo o material base ao ambiente corrosivo, fazendo com que a área que perdeu esta camada tente se reoxidar, ou seja, reparar o filme destruído.

Mathew et alli, 2009, afirmam que um sistema em tribocorrosão pode ser afetado por solicitações mecânicas, por condições eletroquímicas na superfície do metal em desgaste, por propriedades da solução em contato e/ou pelos materiais em contato e suas propriedades de superfície. Esses parâmetros são mutuamente dependentes, tornando, do ponto de vista experimental, o conhecimento bem definido das condições eletroquímicas e de desgaste de suma importância. Afirmam ainda que se um metal é submetido a um deslizamento por contato uma vez tendo formado um filme protetor em sua superfície, um dos seguintes quatro processos, como demonstrado esquematicamente na Figura 2.1, podem ocorrer:

1. Uma camada de filme lubrificante, que inibe os processos de desgaste e corrosão, pode se formar;
2. Devido à formação irregular, a camada de filme tem baixa durabilidade sob condições de contato por deslizamento, podendo produzir uma alta taxa de desgaste e destruição da camada;
3. O filme protetor pode se desgastar e uma junção galvânica entre o filme residual e o substrato subjacente resultar numa corrosão acelerada da superfície;
4. A corrosão e o desgaste poderão atuar independentemente, e a perda de massa do material será uma simples soma dos processos individuais.

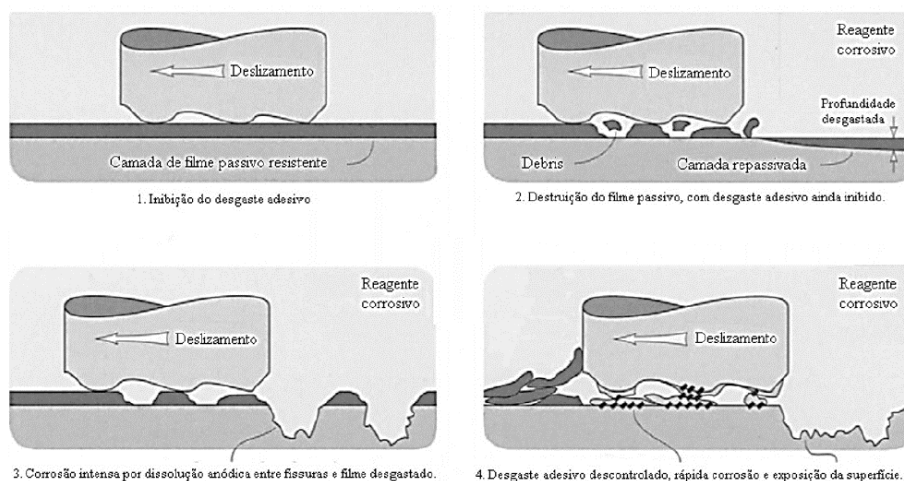


Figura 1.1 – Modelo de integração entre agente corrosivo e superfície desgastada. [Mielczarski, 2015]

Assim, o ensaio de tribocorrosão traz um maior entendimento do comportamento de materiais sob regime de desgaste e corrosão em diferentes meios, facilitando a previsão de falhas destes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados e preparação das peças

Os materiais utilizados são os aços Hardox 500 e SAE 1010. Este último apresenta uma quantidade baixa de carbono e poucos elementos de liga. Com isso, apresenta alta ductilidade, baixa resistência mecânica e dureza, excelente usinabilidade, boa soldabilidade, e tem aplicação ampla na indústria em geral, como em janelas, portões, dutos, entre outros.

O aço Hardox 500 é um metal resistente à abrasão destinado a aplicações em que é necessária resistência ao desgaste. Devido à sua alta resistência, os produtos construídos com este metal podem ser mais simples e leves e ainda transportar cargas mais elevadas. Sua boa soldabilidade e usinabilidade simplificam a produção e, caso necessário, reparação. Além disso, o Hardox 500 tem boa resistência contra impacto mesmo a baixas temperaturas. Assim, o metal pode ser aplicado onde há ataques agressivos do ambiente e, ainda, apresentar vida útil elevada. Ele pode ser utilizado em britadores, peneiras, moegas de medição, alimentadores, transportadores, caçambas, rodas dentadas, entre outros. A microestrutura deste é composta por martensita revenida, já o aço SAE 1010 apresenta predominantemente ferrita, com pequenas quantidades de perlita.

As composições químicas e as propriedades mecânicas dos materiais – Hardox 500 e SAE 1010 – e também do arame de soldagem utilizado para a produção das juntas – AWS EL-12 – são apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 – Composição química dos materiais utilizados. [SSAB, 2015; ArcelorMittal, 2013; Energyarc, 2015]

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	B	Carbono Equivalente	
										CE*	PCM**
Hardox 500 [Máx %]	0,3	1,6	0,025	0,01	0,7	1	0,25	0,25	0,004	0,52	0,36
Aço 1010 [%]	0,080 - 0,130	0,300 - 0,600	≤ 0,030	≤ 0,050	-	-	-	-	-	0,130 - 0,230	0,095 - 0,160
AWS EL-12 [%]	0,08	0,45	0,01	0,01	0,03	-	-	-	-	0,155	0,104

$$* CE = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\text{SSAB, 2015}]$$

$$**PCM = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad [\text{SSAB, 2015}]$$

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados. [SSAB, 2015; SSAB, Oxelosund, 2011; Energyarc, 2015]

	Dureza [HB]	Limite de Escoamento	Resistência a Tração
		R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]
Hardox 500	470 – 530	1250	1550
Aço 1010	105	300	370
AWS EL-12	-	475	-

Para a produção das juntas soldadas foram utilizadas quatro chapas (sendo três do Hardox 500, que possuíam revestimento (*primer*) que confere resistência à corrosão, e uma do SAE 1010) com 200 mm de comprimento, 100 mm de largura e 6 mm de espessura.

As chapas foram montadas a fim de formar dois conjuntos de peças de 200 mm de largura e 200 mm de comprimento: um com chapas similares, duas do aço Hardox 500, e outro com chapas dissimilares, uma do aço Hardox 500 e outra do aço SAE 1010. Em seguida, as faces laterais e a região superior e inferior das chapas, no local onde ocorreria a soldagem, foram lixadas para a retirada de possíveis óxidos e do revestimento das chapas de Hardox 500, com o objetivo de inibir a influência destes na junta soldada.

3.2 Processo de soldagem

O processo de soldagem empregado foi o arco submerso, onde as chapas foram encostadas nas laterais de maior dimensão, sem deixar nenhum espaçamento entre elas. Além disso, utilizaram-se os consumíveis fluxo Carbox neutro ME, secado durante uma hora e trinta minutos a uma temperatura de 250 °C e resfriado no interior do forno, e o arame AWS EL-12, com diâmetro de 2,38 mm.

Os parâmetros de soldagem empregados visaram garantir a penetração total da solda e foram selecionados com base no trabalho desenvolvido utilizando aços com a mesma espessura [Stragliotto et alii, 2016]. Foi utilizado velocidade de soldagem de 10,83 mm/s, corrente contínua de 380 A e tensão elétrica de 22 V, gerando uma energia de soldagem de aproximadamente 0,77 kJ/mm.

3.3 Preparação dos corpos de prova para as caracterizações e ensaio

Foram preparados, de cada conjunto soldado, dois corpos de prova para os ensaios de tribocorrosão e um corpo de prova para as análises de microdureza e macrografia. Inicialmente, os conjuntos foram cortados no plasma para reduzir o tamanho da largura para 94 mm, sendo assim possível cortá-los em peças menores por meio de uma máquina de corte.

As amostras das análises de microdurezas e macrografias foram cortadas no sentido transversal ao cordão de solda, resultando em corpos de 94 mm de largura e 23 mm de comprimento, sendo que este permaneceu no centro do corpo de prova. Já para as análises de tribocorrosão foram preparadas amostras de 30 mm de largura e 32 mm de comprimento, sendo que o cordão de solda ficou localizado próximo a uma das arestas. As últimas ainda

passaram pelo processo de fresamento a fim de planificar a superfície que possuía o cordão de solda para a execução dos ensaios. Após este processo, notou-se a presença de porosidades no centro cordão de solda, como visto na Figura A.1 disposta no Apêndice, mas apenas para o conjunto similar, em uma região (comprimento da amostra) específico.

As amostras foram então lixadas adotando a seguinte ordem de granulometria das lixas: 100, 220, 320, 400, 600 e 1200. Ao final, as amostras para as análises de microdurezas e macrografias foram atacadas com Nital 10% (solução de ácido nítrico em álcool) durante seis segundos.

3.4 Análise de macrografias

A análise de macrografias foi realizada propendendo à avaliação visual das macroestruturas, analisando a geometria da junta soldada, a extensão da zona afetada pelo calor (ZAC) e defeitos (se presentes). Para tanto, as seções transversais dos conjuntos soldados, preparados de acordo com o descrito na seção 3.3, foram digitalizadas através de um *scanner* e o programa *ImageJ* foi utilizado para calcular a área do metal de solda (MS) e, com isso, a diluição.

3.5 Análise de microdurezas

Para os perfis de microdureza Vickers (HV) foram realizadas duas linhas horizontais em cada amostra, partindo de um metal base e finalizando no outro, visando verificar o efeito do aporte de energia nas transformações microestruturais das juntas soldadas. O primeiro perfil foi feito à 1 mm de distância da superfície superior da amostra e o outro a 4 mm. O equipamento usado foi o Microdurômetro Insize, com carga de 500g aplicada sobre a superfície durante 10 segundos e com distância entre endentações de 0,5 mm.

3.6 Análise de tribocorrosão

Os ensaios de tribocorrosão foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Corrosão da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPEC – UFRGS). Com o intuito da obtenção de dados verossímeis, utilizou-se um Tribômetro UMT (*Universal Micro Tribometer*) da marca CETR - *Test Equipment Tribology*, dispositivo empregado para medir atrito e outras propriedades relacionadas ao desgaste entre diferentes materiais e meios [Mielczarski, 2015]. Entretanto, foi acoplado ao tribômetro um potenciostato EG&G Princeton Applied Research (PAR) Modelo 273 com o intuito de medir o potencial de circuito aberto (OCP), ou seja, a resposta do sistema à corrosão. Segundo Landolt, 2007, o OCP é criado pela imersão em eletrólito de um metal o qual sofre reações de dissolução com formação de íons na solução e permanência dos elétrons dentro do metal; estes elétrons polarizam o metal gerando um campo elétrico dentro da solução que faz com que os íons fiquem retidos na vizinhança da interface metal-eletrólito, formando uma dupla camada elétrica e gerando uma diferença de potencial entre o metal e a solução, conhecida como potencial de eletrodo. Os dados foram controlados via computador e empregou-se o método do tipo esfera-sobre-plano (ou *ball-on-flat*) [Azzi et al., 2009].

Além disso, uma esfera de alumina (Al_2O_3), a qual apresenta uma dureza em torno de 2000 HV [Mielczarski, 2015] e diâmetro de 4,762 mm, foi utilizada para a execução dos movimentos lineares sobre as amostras. Ademais, o sistema conta com dois eletrodos: o primeiro, conforme já mencionado, é a própria amostra (Eletrodo de Trabalho – ET), o qual é fixado na parte inferior da célula, e o segundo é o eletrodo de referência (Eletrodo de Calomelano Saturado – ECS), este acoplado na parte lateral próxima a amostra, ambos conectados ao PAR. O meio corrosivo, ou seja, o eletrólito utilizado, foi NaCl 0,05 mol (água “artificial”). Os ensaios foram realizados nos metais base, nos metais de solda e nas regiões das zonas afetadas pelo calor que apresentavam a menor dureza, em ambas juntas soldadas, sendo a área exposta ao fluido de 177 mm².

A Figura 3.1 (a) apresenta uma visão geral dos componentes do sistema e a Figura 3.1 (b) exhibe, de forma esquemática, o sistema de uma célula utilizada em ensaios de

tribocorrosão. Nos ensaios foram utilizados os mesmos parâmetros de Mielczarski, 2015, exibidos na Tabela 3.3.

Utilizando como base o modelo de Azzi et alli, 2009, as peças foram imersas no eletrólito e mediu-se o OCP durante 1.800 segundos (30 minutos). Então, iniciou-se o desgaste e, além do OCP, monitorou-se o coeficiente de atrito durante 10.800 segundos (3 horas). Após cessar o desgaste, durante 3.600 segundos (1 hora), continuou-se a registrar o OCP dos materiais. Essa sequência pode ser observada na Figura 3.2.

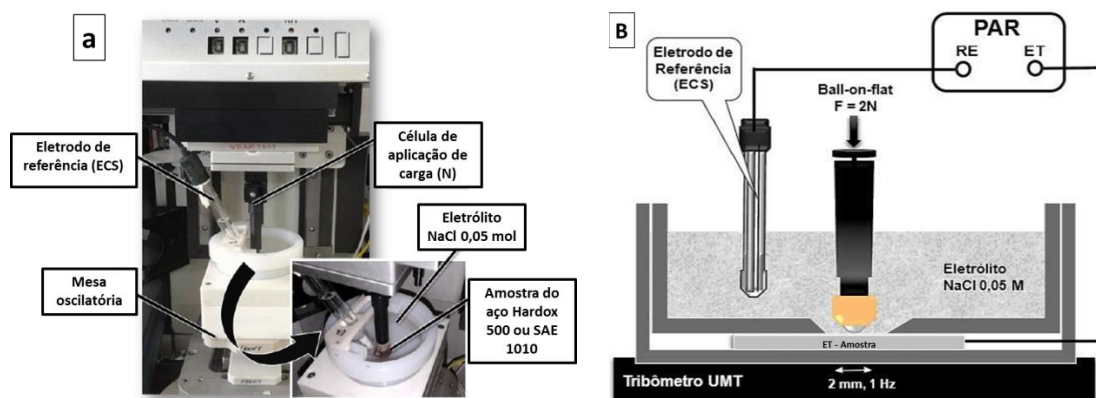


Figura 3.1 – (a) Visão geral do tribômetro UMT adaptado para ensaios em tribocorrosão. (b) Sistema esquematizado de uma célula utilizada nos ensaios. [adaptado de Mielczarski, 2015].

Tabela 3.3 – Parâmetros utilizados nos ensaios de tribocorrosão. [Mielczarski, 2015].

Parâmetros	Dados
Força normal aplicada	2 N
Frequência	1 Hz
Tempo de desgaste	3 horas
Tamanho da trilha	2 mm
Eletrólito	NaCl 0,05 mol
Temperatura	$22 \pm 5^{\circ}\text{C}$
Eletrodo de referência	ECS

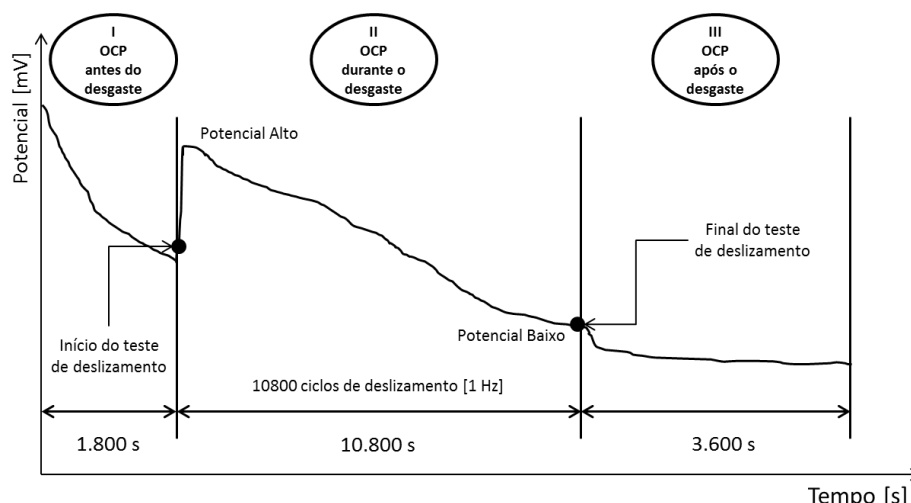


Figura 3.2 Sequência de operações durante o teste de tribocorrosão ilustrada pela evolução do potencial de circuito aberto (OCP). [adaptado de Azzi et alli, 2009]

3.7 Análise de perfilometria

As regiões contendo as trilhas desgastadas das amostras foram analisadas por perfilômetro a laser para obter medidas da topografia e outras características superficiais

associadas aos ensaios de tribocorrosão, sendo as imagens processadas pelo *software* Vision64 e o ensaio realizado no Laboratório de Análises Multiusuários (LAMAS) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Macrografias

Na Figura 4.1 (a) é visto que o conjunto de similares apresenta uma zona afetada pelo calor uniforme em ambos os lados, penetração total da solda e ausência de defeitos macros, tendo uma taxa de diluição de 78,8%. Nota-se também que a zona afetada pelo calor do metal Hardox 500 no conjunto de dissimilares, Figura 4.1 (b), é análoga à dos similares, entretanto, a ZAC do SAE 1010 demonstra-se menor, ou seja, o metal base sofreu menos influência do calor gerado pela solda. Este último conjunto apresenta uma taxa de diluição de 72,4%, valor um pouco inferior ao anterior, que pode ser atribuído inclusive às diferentes composições químicas e, com isso, às pequenas variações de propriedades físicas dos metais base empregados. A junta de dissimilares também apresenta penetração total e falta de inclusões ou imperfeições aparentes. Ainda, o formato do metal de solda é diferente entre os conjuntos devido à distribuição de energia não ser uniforme em relação às peças durante o processo de soldagem.

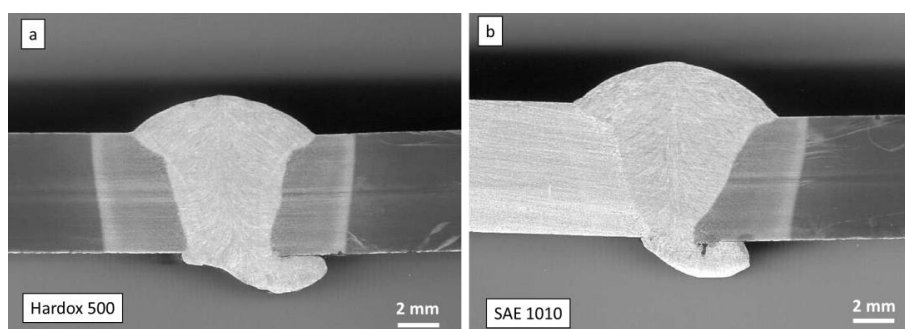


Figura 4.1 – Macrografia do conjunto de similares (a) e de dissimilares (b).

4.2 Microdurezas

Os resultados obtidos nas análises de microdureza são expostos graficamente nas Figuras 4.2 e 4.3. Nestas, estão demarcadas onde se encontram as zonas afetadas pelo calor, o metal de solda e os materiais base no perfil de microdureza feito a 1 mm da superfície, uma vez que esta região é a mais próxima de onde o ensaio de tribocorrosão foi realizado. Os perfis realizados a 4 mm se encontram no Apêndice.

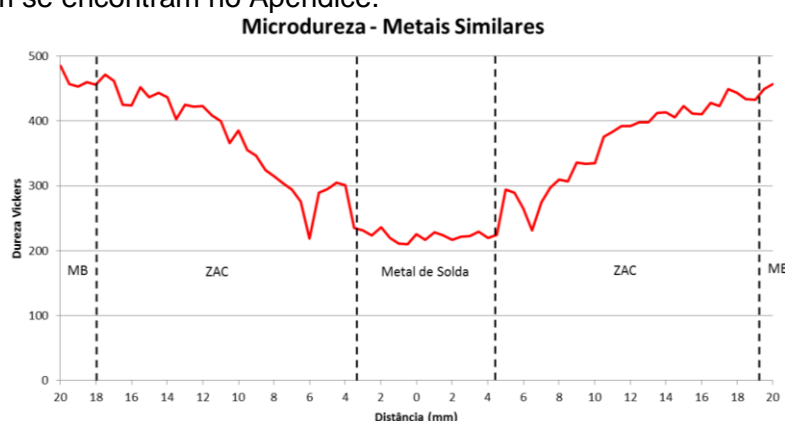


Figura 4.2 – Perfil de microdureza do conjunto de similares, endentações realizadas a 1 mm da superfície (ZAC = zona afetada pelo calor, MB = Hardox 500).

É visto nas Figuras 4.2 e 4.3 que a ZAC apresenta uma transição das durezas dos metais base Hardox 500, de solda e SAE 1010, este último presente somente no conjunto de

dissimilares. Os perfis gerados são decorrentes das alterações de microestruturas sucedidas durante o processo de soldagem, sendo que a dureza na junta de Hardox 500, partindo do centro do metal de solda, primeiro aumenta e depois reduz para então aumentar, enquanto a do SAE 1010 sempre decresce. Observa-se, ainda, que a extensão da ZAC no aço Hardox 500 é bem maior do que no aço SAE 1010, devido à maior sensibilidade da sua microestrutura inicial (martensita revenida) ao ciclo térmico.

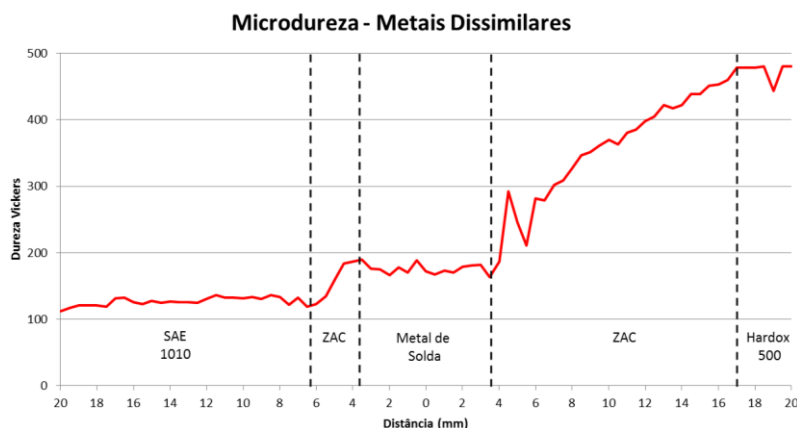


Figura 4.3 – Perfil de microdureza do conjunto de dissimilares, endentações realizadas a 1 mm da superfície (ZAC = zona afetada pelo calor).

4.3 Tribocorrosão

4.3.1 Metais base

A Figura 4.4 mostra os valores medidos dos potenciais de circuito aberto (OCP) e dos coeficientes de atrito apresentados pelos metais SAE 1010, Hardox 500 sem revestimento e Hardox 500 com revestimento.

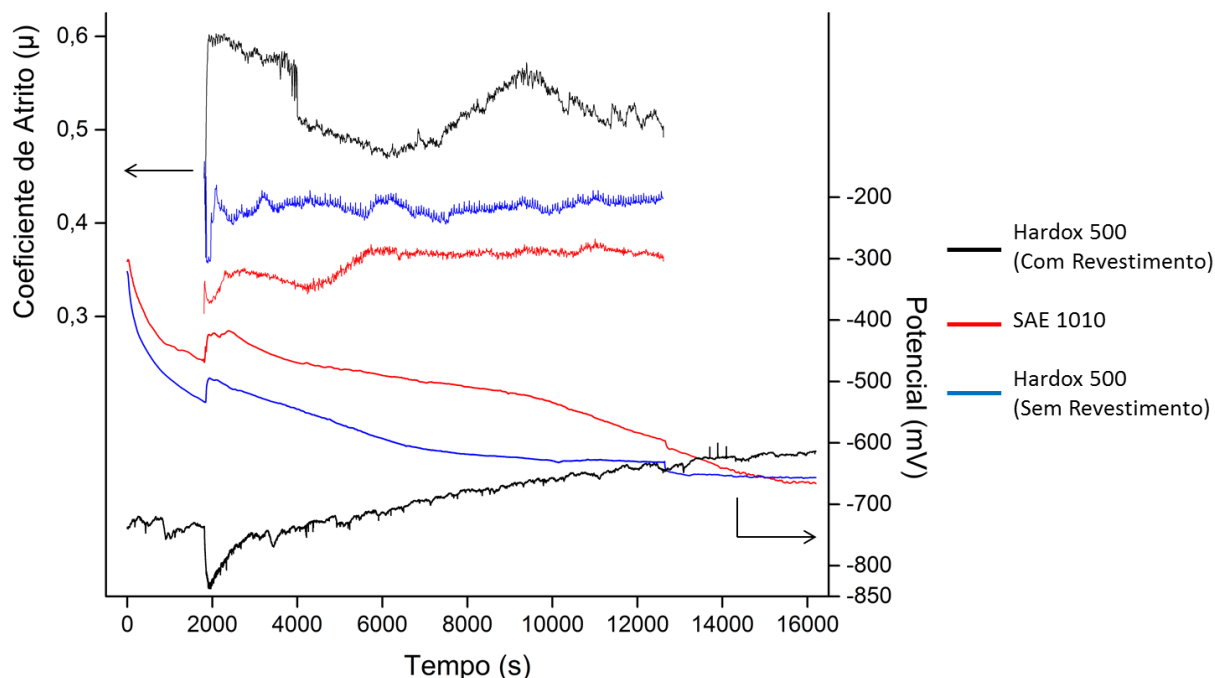


Figura 4.4 – Potencial e coeficiente de atrito medido nos metais base durante o ensaio de tribocorrosão.

No momento inicial, de zero a 1.800 segundos de ensaio, o potencial medido corresponde ao estado passivo de toda a superfície das peças imersas na solução. Os aços SAE 1010 e Hardox 500 sem revestimento apresentam diminuição nos seus potenciais,

indicando corrosão nas superfícies dos materiais, mas o primeiro apresenta potencial superior ao segundo durante o período, possuindo assim uma maior resistência à corrosão. As quedas dos potenciais com conseqüente aumento da corrosão se devem às microestruturas e à corrosão das bordas dos grãos, de acordo com Pagotto et alli, 2015. Já o potencial do Hardox 500 com revestimento apresenta pequena variação em torno de -730 mV, ou seja, sua resistência à corrosão se mantém aproximadamente constante enquanto submerso na solução aquosa e é menor em relação aos demais metais. Esses valores menores que correspondem a uma menor resistência à corrosão ocorrem provavelmente porque a camada de proteção (*primer*) serve como uma proteção catódica.

Após esses primeiros trinta minutos, a força normal e a velocidade da esfera deixam de ser zero e as peças começam a sofrer desgaste. Neste momento, os potenciais medidos dos metais SAE 1010 e Hardox 500 sem revestimento apresentam aumento. Isso é explicado pelo fato que a área friccionada tem sua superfície parcialmente destruída e adquire potencial que corresponde ao de um material ativo onde reações de redução ocorrem.

Entretanto, ao contrário dos demais, é observada uma queda no potencial do Hardox 500 com revestimento, supostamente devido à destruição parcial da camada protetora *primer* do metal, expondo-a mais ao meio aquoso. Após este pico de queda, o potencial do material apresenta acréscimo aproximadamente constante, o que indica um aumento na sua resistência à corrosão, porém ao final da etapa de desgaste, o seu valor de potencial, -638 mV, ainda está abaixo dos valores dos demais aços, que são de -600 mV para o SAE 1010, e -630 mV para o Hardox 500 sem revestimento.

A medição do coeficiente de atrito se inicia também com os movimentos da esfera. Segundo Wislocki, 2013, no início do ensaio o primeiro contato da esfera do tribômetro se dá diretamente na camada de óxido formada na etapa anterior, o que ocasiona um deslizamento mais favorável sem que ocorra adesão de asperezas das superfícies, resultando num coeficiente de atrito menor. Em um segundo momento, com a diminuição dessa camada, começa a ocorrer o contato direto entre asperezas, elevando-o. Na Figura 4.4, nota-se que os valores de coeficiente de atrito do SAE 1010 são menores do que os do Hardox 500 sem revestimento, mas os comportamentos dos coeficientes de atrito ao longo da etapa são similares: no início do desgaste, há um aumento do valor de coeficiente de atrito, seguido por uma queda brusca, e então há novamente uma elevação do valor e ele oscila até apresentar uma certa estabilidade. Foi observado que no final dessa etapa de desgaste, o coeficiente do SAE 1010 ficou em torno de 0,37, enquanto que o do Hardox 500 sem revestimento ficou em 0,42. Os valores diferentes de coeficientes entre esses aços, Hardox 500 sem revestimento e SAE 1010, provavelmente estão associados às diferentes durezas (e microestruturas) dos materiais, e aos seus distintos comportamentos em corrosão – a camada de óxido pode atuar como um lubrificante sólido. O aço Hardox 500 com revestimento apresentou valores de coeficiente de atrito bem superiores em relação ao demais, e com maiores variações durante o ensaio. Esse comportamento pode ser atribuído à sua camada protetora *primer*, a qual possui elevada rugosidade.

Uma vez encerrado o movimento da esfera, o potencial do Hardox 500 sem revestimento sofre uma queda para -656 mV, o qual se mantém constante devido à reoxidação da camada, ou seja, por ter formado novamente o filme protetor. O metal SAE 1010 apresenta um potencial em queda ultrapassando o do Hardox 500 sem revestimento em 15.000 segundos e terminando o ensaio com -666 mV, este demorando mais a estabilizar. Já o Hardox 500 com revestimento apresenta um potencial ainda em crescimento, superando o dos demais metais em 13.500 segundos de ensaio, finalizando o experimento com -613 mV. Evidencia-se a capacidade desse último em aumentar a sua resistência à corrosão, pelo menos enquanto apresentar a camada protetora.

Analisando as imagens das trilhas na Figura 4.5, percebe-se que a trilha do SAE 1010 é mais profunda e larga em relação à do Hardox 500 sem revestimento. Isto confirma o fato de que o Hardox 500 sem revestimento apresenta maior resistência ao desgaste que o SAE 1010. Já a trilha do Hardox 500 com revestimento é mais larga, entretanto, nota-se que a esfera parece não ter chegado ao metal base, somente a camada protetora foi danificada.

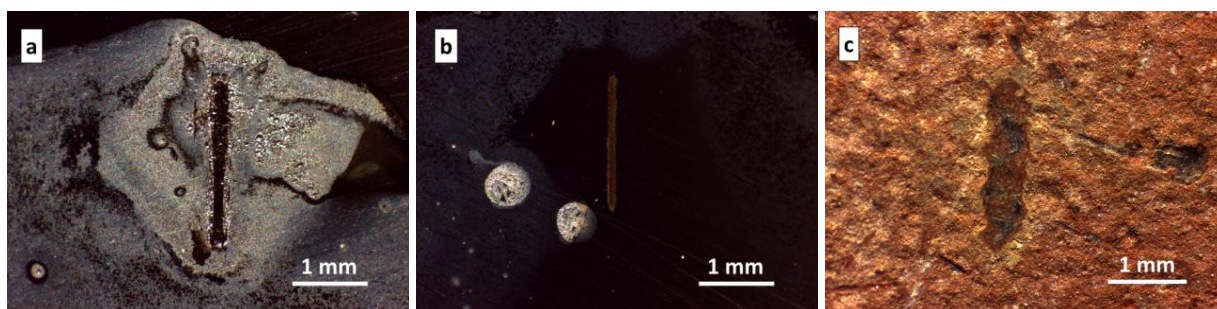


Figura 4.5 – Imagens das trilhas após ensaio de tribocorrosão dos materiais base. (a) Aço 1010. (b) Hardox 500 sem revestimento. (c) Hardox 500 com revestimento.

4.3.2 Zonas afetadas pelo calor

Na Figura 4.6 são mostrados os resultados dos ensaios de tribocorrosão efetuados nas regiões de menor dureza das ZAC das duas juntas soldadas. Ou seja, na junta dissimilar, o ensaio foi realizado no lado do aço SAE 1010, no qual a ZAC apresentava o valor de 120 HV, e na junta similar, na região da ZAC que possuía o valor aproximado de 220 HV.

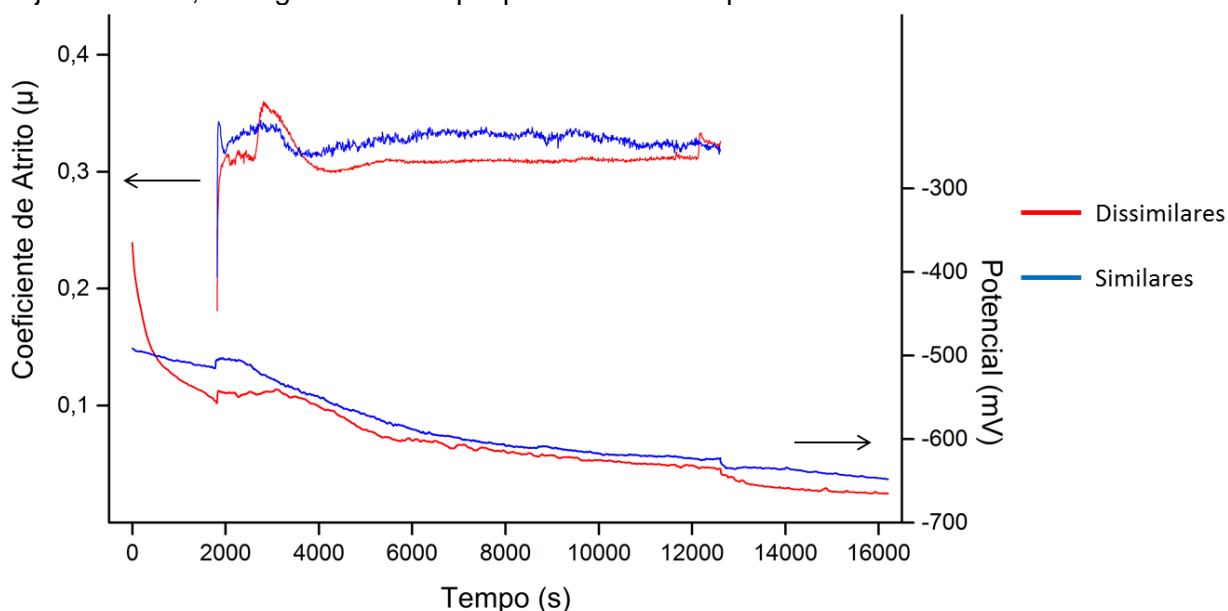


Figura 4.6 – Potencial e coeficiente de atrito medido do conjunto de similares e dissimilares na zona afetada pelo calor durante o ensaio de tribocorrosão.

Na Figura 4.6, o aspecto geral das curvas de OCP é similar àquele observado na Figura 4.4 para os aços SAE 1010 e Hardox 500 sem revestimento. Na primeira etapa de ensaio, de zero até 1.800 segundos, há uma queda acentuada do potencial medido no conjunto de dissimilares, e menos acentuada no conjunto de similares. Comparado aos potenciais medidos do material base Hardox 500 sem revestimento, a ZAC do conjunto de similares apresenta uma maior resistência à influência do meio corrosivo, pois seus valores são menos negativos, e isso provavelmente está associado à alteração das microestruturas presentes nessa região ensaiada. Já os dissimilares apresentam comportamento semelhante ao do metal base SAE 1010, mostrando que as alterações da microestrutura nessa região da ZAC, nesse aço, influenciam menos na resistência à corrosão.

Terminado o primeiro momento e iniciado os movimentos da esfera, os dois conjuntos tem aumento em seu potencial, porém esses aumentos são visivelmente menores do que os dos metais base no mesmo período. Assim como nos metais base, após esse aumento existe uma pequena região onde o OCP é estável, e então a queda dos valores à medida que o desgaste acontece. Porém, é observado que as curvas de OCP para essas regiões da ZAC

são mais próximas e, excetuando o período inicial da etapa, possuem aproximadamente a mesma declividade. Os valores finais de potencial na etapa também são similares: -620 mV e -630 mV para as juntas similares e dissimilares, respectivamente.

Os coeficientes de atrito apresentam instabilidade principalmente na parte inicial dessa segunda etapa. Após, ficam relativamente estáveis em 0,32 para a ZAC dos similares e 0,31 para a ZAC dos dissimilares. Percebe-se, no final da etapa de desgaste, um pico no coeficiente desse último conjunto, com posterior queda. Provavelmente, houve a incorporação de óxidos (*debris*) à zona de desgaste, que depois foram expulsos com a continuidade do movimento da esfera sobre o material.

Na última etapa do ensaio, o potencial da região da ZAC da junta de dissimilares apresenta queda constante, mas não acentuada, estabilizando em -665 mV. Já a região da ZAC do conjunto de similares tem uma queda brusca para -634 mV permanecendo estável inicialmente e entrando novamente em queda, finalizando as medições em -648 mV. É interessante observar que o potencial final apresentado pela região da ZAC da junta dissimilar é praticamente o mesmo do que o do aço metal base SAE 1010. Os valores de dureza dos dois eram semelhantes, sendo um pouco menor nessa região da ZAC do que no metal base, indicando pequena variação microestrutural entre eles. Sobre o conjunto de similares, as transformações microestruturais nessa região certamente foram significativas, pois há uma grande diferença de durezas em relação ao Hardox 500 metal base, o que levou aos diferentes comportamentos nos ensaios.

Pela análise da Figura 4.7, as trilhas dos dois conjuntos apresentam características semelhantes, porém há uma região escura ao longo da borda da trilha no conjunto dissimilar, provavelmente óxido.

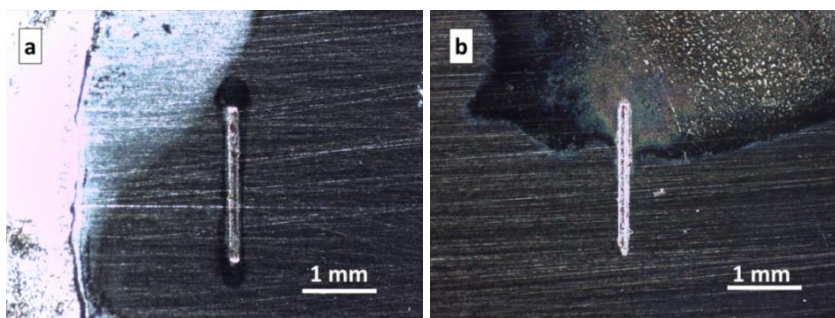


Figura 2.7 – Imagens das trilhas após ensaio de tribocorrosão na região de menor dureza da zona afetada pelo calor. (a) Conjunto de dissimilares. (b) Conjunto de similares.

4.3.3 Metais de solda

Na Figura 4.8 podem ser vistos os resultados dos ensaios de tribocorrosão para os metais de solda para as juntas similares e dissimilares. O comportamento geral é o mesmo já observado nos ensaios anteriores, Figuras 4.4 e 4.6, com queda do potencial.

Iniciado o movimento da esfera, os potenciais dos metais de solda dos dois conjuntos sofrem ligeiro aumento. Após, o metal de solda da junta de similares sofre uma queda leve constante e estabiliza ao final da etapa em torno de -610 mV. Já o metal de solda do conjunto de dissimilares apresenta uma redução acentuada do potencial no início da etapa e estabiliza aproximadamente na metade do período, em -658 mV.

Como nos casos anteriores, os coeficientes de atrito sofrem maiores variações até aproximadamente a metade da etapa, ficando então com valores relativamente estáveis. No metal de solda, o conjunto de similares apresenta valores muito próximos dos vistos na zona afetada pelo calor, entretanto, os dissimilares mostram valores maiores na mesma comparação. Pela adição do arame no processo de soldagem, e devido aos ciclos térmicos, sabe-se que as microestruturas no metal de solda e na região da ZAC, em ambos conjuntos, são diferentes. No entanto, os valores de durezas nessas regiões, comparados para cada conjunto, são próximos na junta similar e diferentes na dissimilar, sendo nesta em torno de 60 HV maior no metal de solda do que na região da ZAC de menor dureza. Essa diferença na

dureza pode ser um dos fatores que explica o maior coeficiente de atrito apresentado pelo metal de solda da junta dissimilar, comparado à sua região da ZAC ensaiada.

Na terceira etapa do ensaio, o conjunto de dissimilares sofre uma queda para -670 mV e estabiliza em seguida no valor de -675 mV. Já o dos similares sofre uma leve queda até o final do ensaio, finalizando em -636 mV.

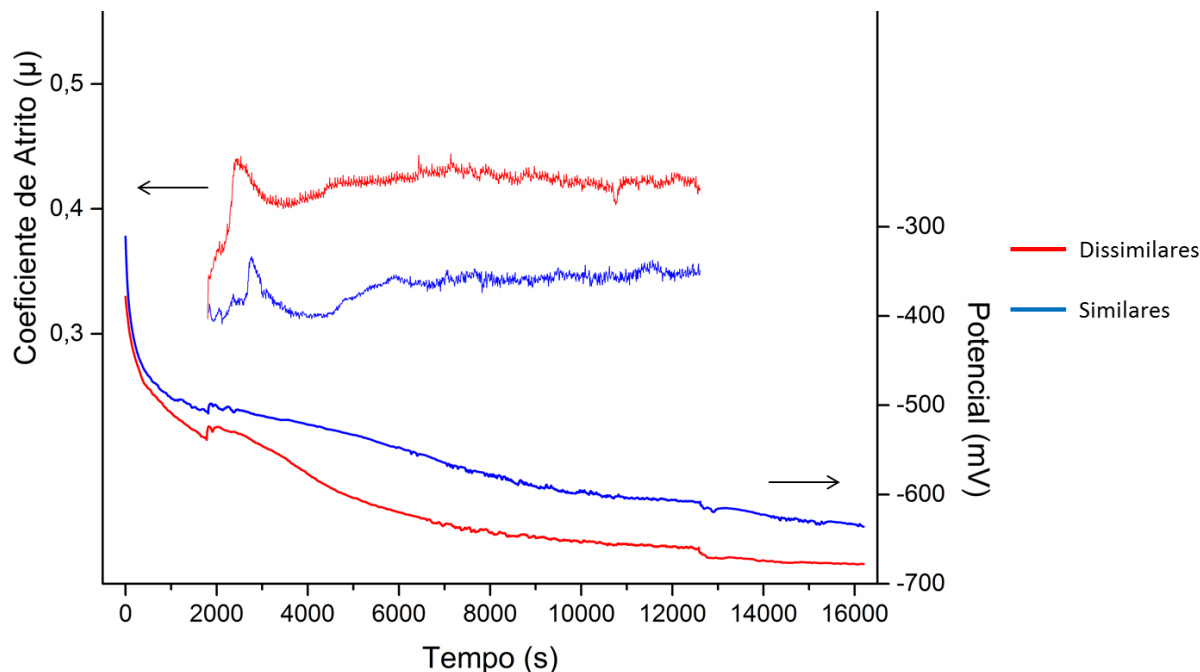


Figura 4.8 – Potencial e coeficiente de atrito medido do conjunto de similares e dissimilares no metal de solda durante o ensaio de tribocorrosão.

A trilha do conjunto de dissimilares, conforme visto na Figura 4.9 (a), apresenta uma região escura ao longo da trilha, como apresentado na zona afetada pelo calor. A Figura 4.9 (b) sugere que o conjunto de similares sofreu corrosão tanto na trilha quanto na região próxima a esta.

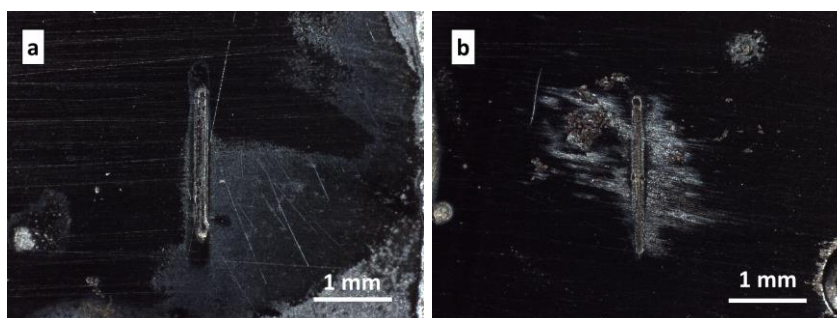


Figura 3.9 – Imagens das trilhas após ensaio de tribocorrosão no metal de solda. (a) Conjunto de dissimilares. (b) Conjunto de similares.

4.4 Perfilometria

4.4.1 Metais base

Na Figura 4.10 (a) é visto que o Hardox 500 com revestimento tem sua camada protetora danificada na trilha e alguns pontos de maior profundidade na superfície, sendo estes, provavelmente, resultantes das características do *primer*. Já o Hardox 500 sem revestimento, Figura 4.10 (c), apresenta formação de óxidos principalmente na borda de sua trilha. O aço SAE 1010, Figura 4.10 (b), apresenta pites principalmente nas bordas da trilha,

resultantes da corrosão, sugerindo a formação de um par galvânico entre a borda da trilha e o resto da superfície da peça. Ainda, na superfície desse aço há indícios de corrosão generalizada vide a variação de topografia. No Apêndice, na Figura C.1, gráficos em duas dimensões dos perfis são dispostos.

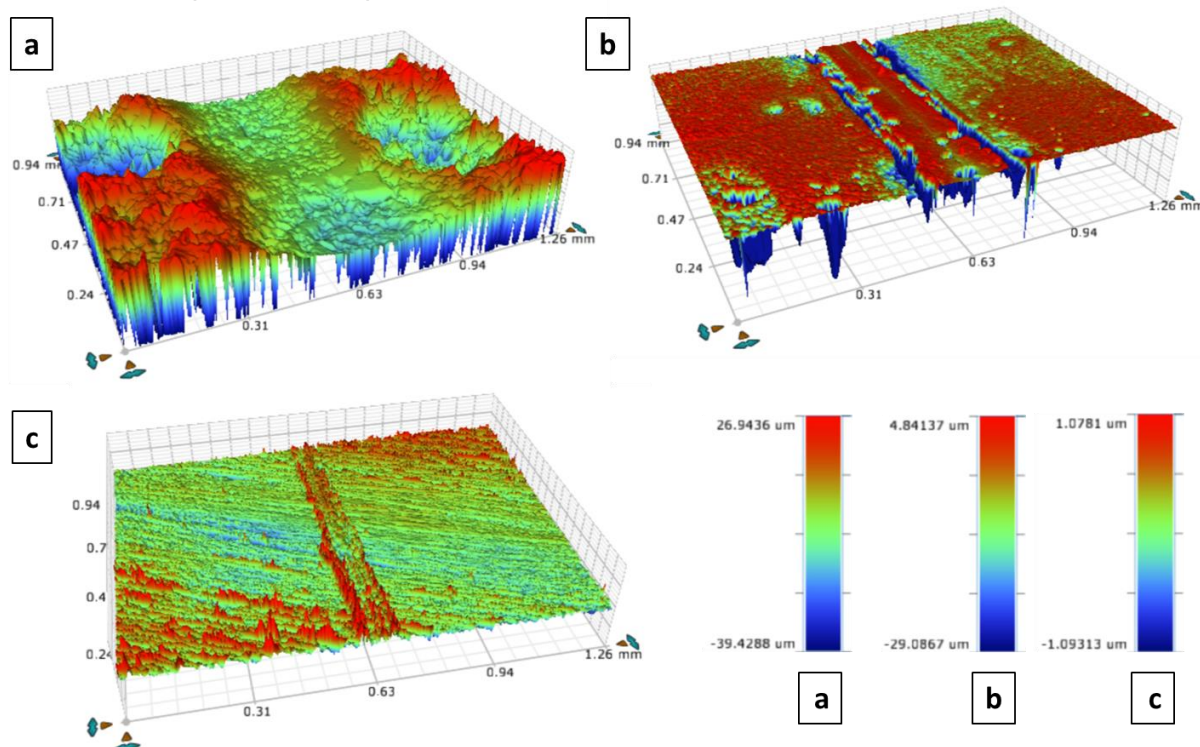


Figura 4.10 – Imagens resultantes da perfilometria do metal base (a) Hardox 500 com revestimento, (b) SAE 1010 e (c) Hardox 500 sem revestimento após ensaio de tribocorrosão.

4.4.2 Zonas afetadas pelo calor

A Figura 4.11 apresenta os perfis obtidos por meio da perfilometria dos conjuntos de similares e dissimilares realizados na zona afetada pelo calor.

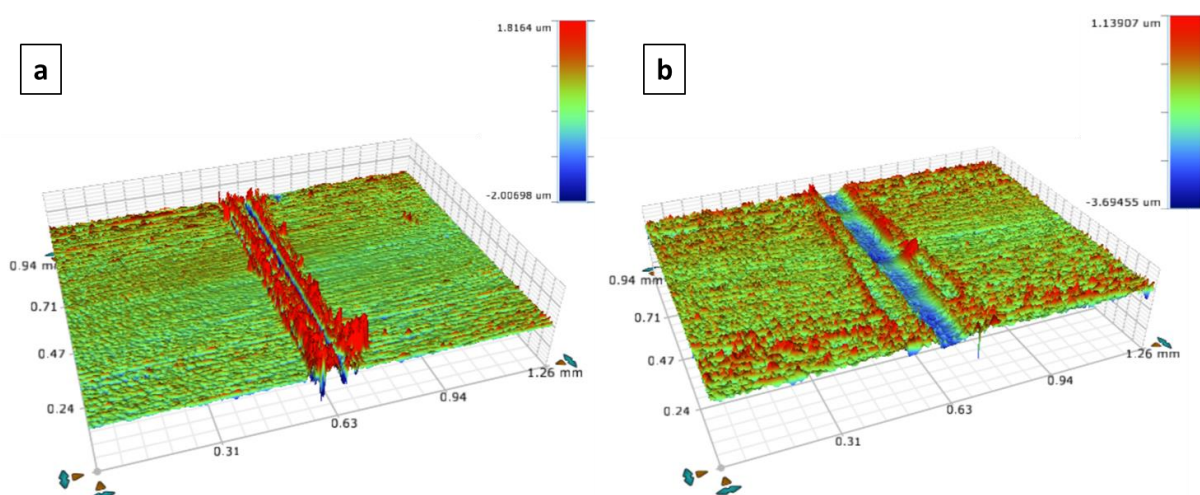


Figura 4.11 – Imagens resultantes da perfilometria da zona afetada pelo calor do (a) conjunto de similares e do (b) conjunto de dissimilares após ensaio de tribocorrosão.

O conjunto de similares, Figura 4.11 (a), apresenta uma trilha com diferentes profundidades, sendo em parte maior que o nível da superfície, assim como seu contra corpo

(imagem disposta no Apêndice na Figura D.2), provavelmente devido à oxidação da trilha ocorrida durante o ensaio, se mostrando mais intensa nas bordas desta. A trilha dos dissimilares evidencia maior corrosão na superfície em relação ao conjunto de similares nesta área, além disso, a região próxima à trilha apresenta oxidação conforme visto na Figura 4.7 (a), onde é possível ver uma região escura ao redor da trilha.

4.4.3 Metais de Solda

A perfilometria realizada no metal de solda das amostras apresenta comportamento, em parte, semelhante ao das zonas afetadas pelo calor. As bordas da trilha do conjunto de similares apresentam corrosão enquanto que o resto da superfície tem certa uniformidade. Ainda, as bordas da trilha do conjunto de dissimilares também apresentam oxidação, além de a superfície desta área apresentar maior corrosão em relação à dos similares. Nos dissimilares, nota-se que houve menor penetração da esfera na amostra durante o desgaste em relação à zona afetada pelo calor, provavelmente devido às diferentes durezas apresentadas nestas regiões.

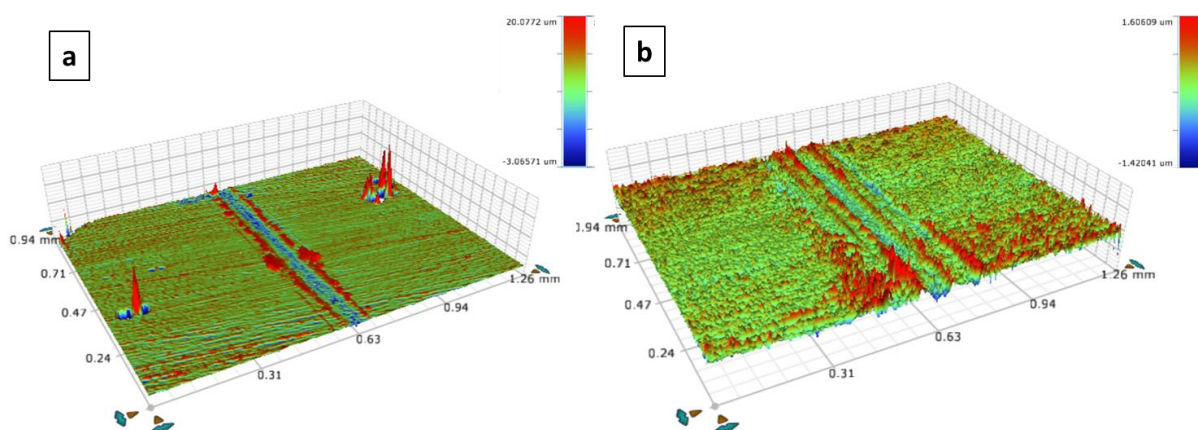


Figura 4.12 – Imagens resultantes da perfilometria no metal de solda do (a) conjunto de similares e do (b) conjunto de dissimilares após ensaio de tribocorrosão.

5. CONCLUSÕES

- Foi possível obter juntas no conjunto de similares e dissimilares com os parâmetros utilizados;
- Segundo os resultados dos perfis de dureza, a soldagem modifica a dureza das amostras nas zonas afetadas pelo calor e no metal de solda, sendo que a zona afetada no Hardox 500 é bem maior que a do SAE 1010;
- O metal base SAE 1010 sofre maior corrosão, de forma generalizada e apresentando pites conforme visto no ensaio de perfilometria, em relação ao Hardox 500 sem revestimento e ao Hardox 500 com revestimento, sendo que o último apresenta maior resistência à corrosão devido ao seu *primer*;
- O conjunto de similares apresenta comportamento no metal de solda e na zona afetada pelo calor semelhante ao do metal base, porém na ZAC há maior produto de corrosão, provavelmente como influência da microestrutura, uma vez que a durezas nessas zonas são parecidas;
- O conjunto de dissimilares apresenta, na zona afetada pelo calor e no metal de solda, superfícies mais irregulares após corrosão e desgaste, sugerindo que este sofre maior agressão do meio do que no conjunto de similares;
- Os resultados indicam que o conjunto de dissimilares apresenta resultados inferiores em tribocorrosão com a solução utilizada neste ensaio;
- Considerando os resultados obtidos neste estudo, com as condições especificadas, numa aplicação prática que envolva tribocorrosão, em um conjunto similar, a região da

solda sempre apresentará comportamento inferior ao apresentado pelo aço Hardox 500, uma vez que seu *primer* o protege. Já em um conjunto de dissimilares, o aço SAE 1010 apresentará comportamento inferior em comparação ao restante do conjunto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ArcelorMittal; “**Guia do Aço**”, Aços Longos, 2013.
- ASTM G40-13; “**Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- Azzi, M., Paquette, M., Szpunar, J. A., Klemberd-Sapieha, J. E., Martinu, L.; “**Tribocorrosion behavior of DLC-coated 316L stainless steel**”, Canadá, 2009.
- Durer, Cesar; “**Processo de Soldagem com Eletrodo Revestido**”, FMEP, 2011.
- Energyarc, Industrial Ltda.; “**Item # AWS EL-12, Arame para arco submerso AWS EL-12**”, 2015.
- Landolt, D.; “**Corrosion and surface chemistry of metals**”, EFPL, 2007.
- Manhabosco, T. M.; “**Tribocorrosão da liga Ti6Al4V, liga nitretada Ti6Al4V, revestida por filmes *Diamond-Like Carbon (DLC)* e obtenção eletroquímica de filmes DLC**”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- Mathew, M. T., Pai, P. S., Pourzal, R., Fischer, A., Wimmer, M. A.; “**Significance of Tribocorrosion in Biomedical Applications: Overview and Current Status**”, 2009.
- Mielczarski, R. G.; “**Estudo do comportamento tribológico e em tribocorrosão do aço inoxidável martensítico DIN 1.4110**”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- Neale, M. J.; “**Tribology Handbook**”, Newnes-Butterworths, 1973.
- Pagotto, J. F., Montemor, M. F., Recio, F. J., Motheo, A. J., Simões, A. M., Herrasti, P.; “**Visualisation of the Galvanic Effects at Welds on Carbon Steel**”, Instituto de Química de São Carlos, 2015.
- Ponthiaux, P., Wenger, F., Celis, J.P.; “**Tribocorrosion: Material behavior under combined conditions of corrosion and mechanical loading**”, École Centrale Paris, 2012.
- SSAB; “**Hardox 500 – General Product Description**”, Hardox Wear Plate, 2015.
- SSAB, Oxelosund; “**Dobra/Corte por cisalhamento**”, Hardox Chapa Antidesgaste, 2011.
- Stragliotto, B. V., Machado, I. G.; “**Tratamento térmico por indução eletromagnética em juntas soldadas com o processo de arco submerso**”, Salão de Iniciação Científica Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- Wislocki, Z.L.; “**Propriedades superficiais de chapas de Ti-CP conformadas por estampagem incremental**”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

APÊNDICE

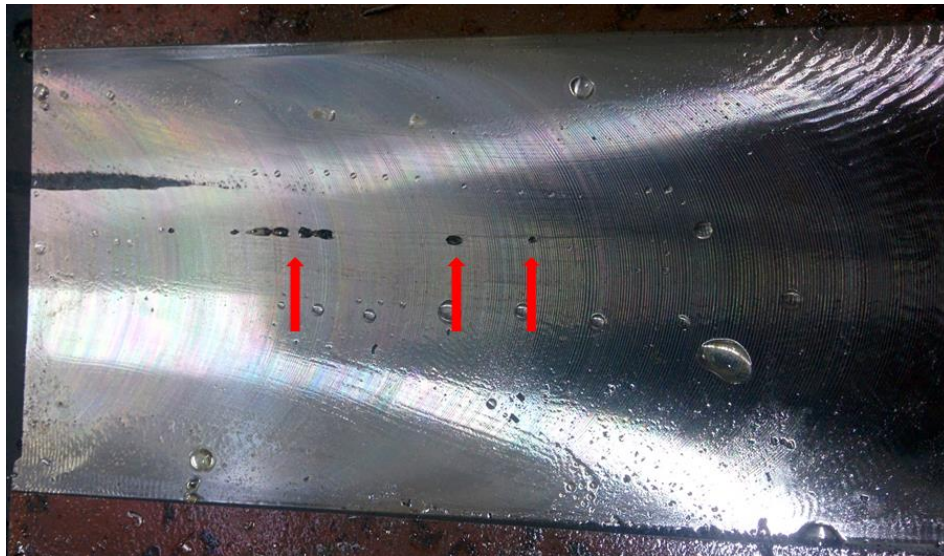


Figura A.1 – Imagem do conjunto de similares após o processo de fresamento evidenciando a porosidade encontrada.

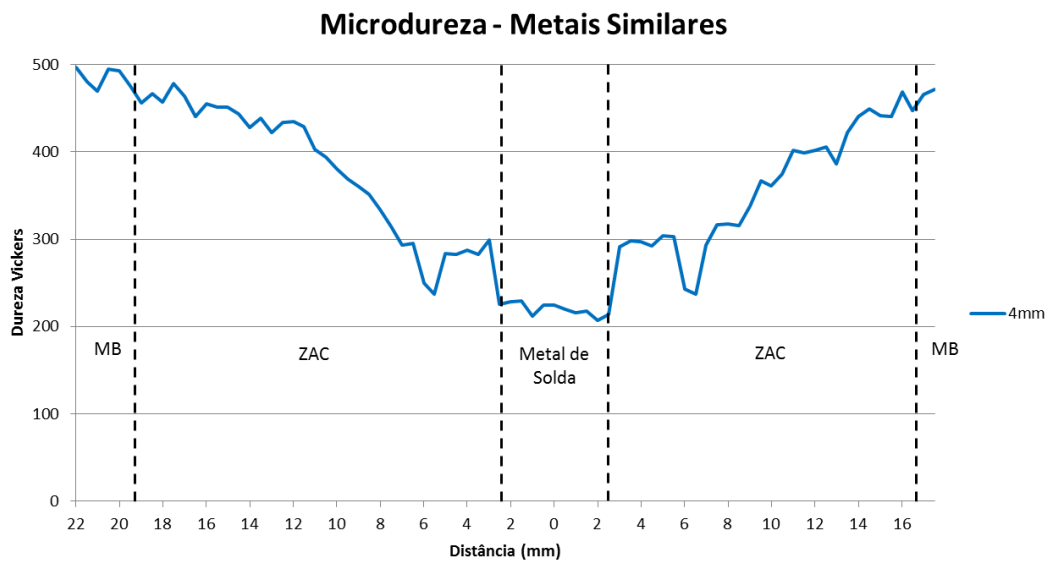


Figura B.1 – Perfil de microdureza do conjunto de similares para as endentações realizadas a 4 mm da superfície (ZAC = zona afetada pelo calor, MB = Hardox 500).

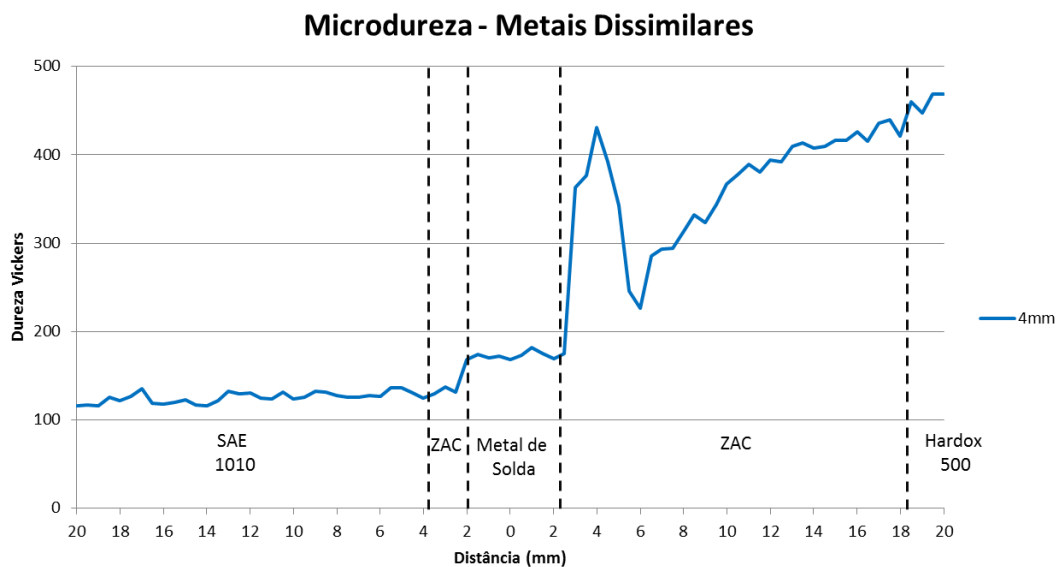


Figura B.2 – Perfil de microdureza do conjunto de dissimilares para as endentações realizadas a 4 mm da superfície (ZAC = zona afetada pelo calor).

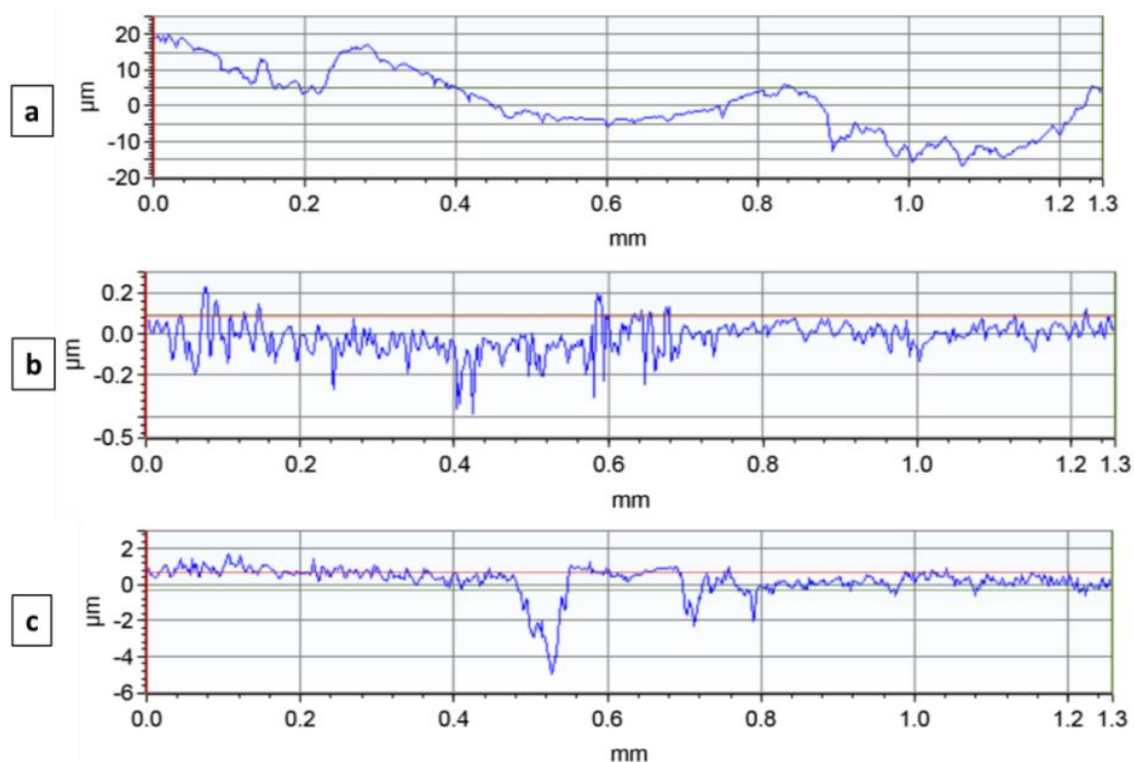


Figura C.1 – Perfis gerados com um perfilômetro, avaliados aproximadamente no centro das trilhas, transversalmente a elas. (a) Hardox 500 com revestimento. (b) Hardox 500 sem revestimento. (c) SAE 1010.

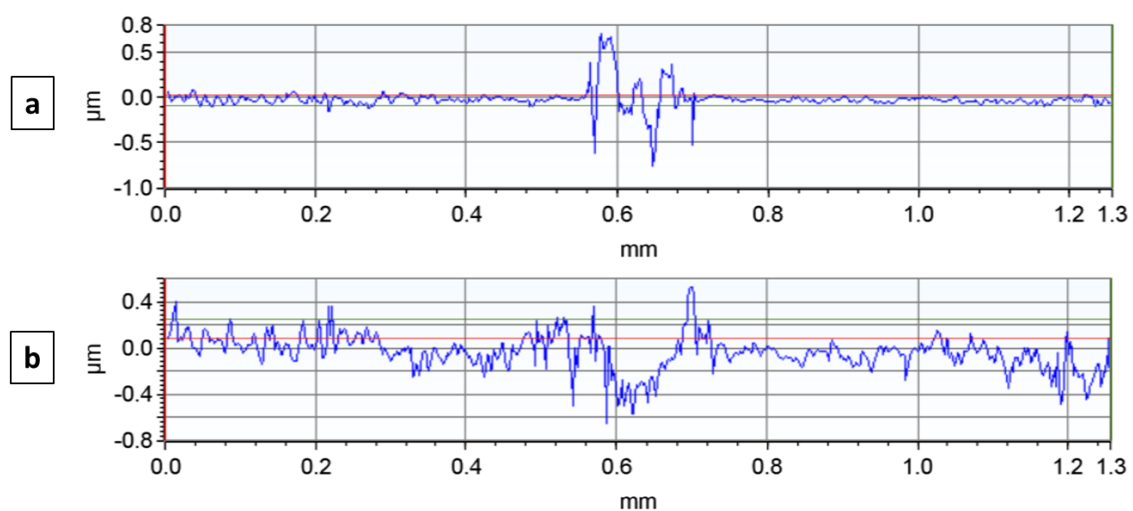


Figura C.2 – Perfis gerados com um perfilômetro na zona afetada pelo calor, avaliados aproximadamente no centro das trilhas, transversalmente a elas. (a) Similares. (b) Dissimilares.

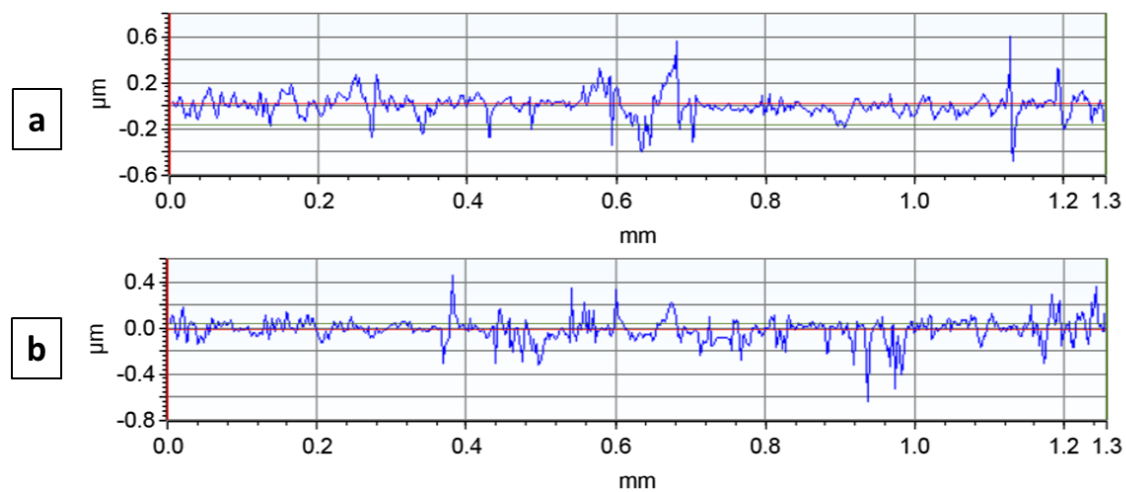


Figura C.3 – Perfis gerados com um perfilômetro no metal de solda, avaliados aproximadamente no centro das trilhas, transversalmente a elas. (a) Similares. (b) Dissimilares.

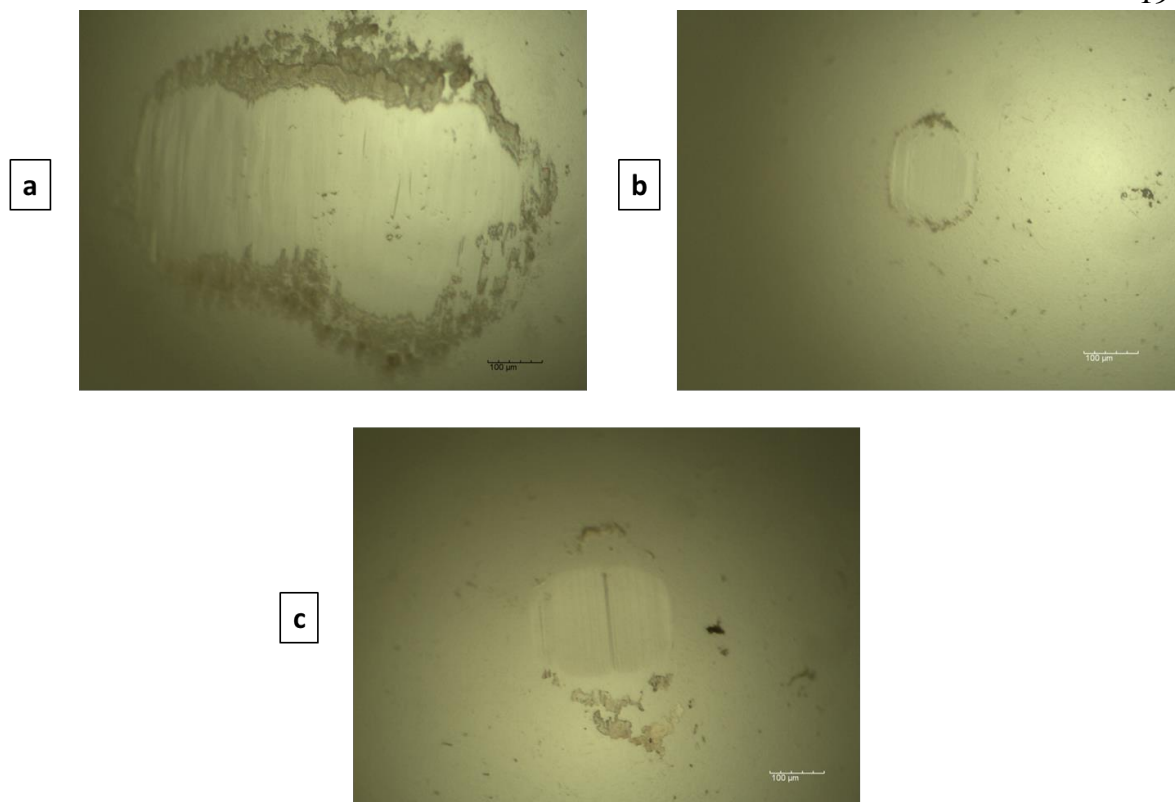


Figura D.1 – Imagem da esfera após utilização no ensaio de tribocorrosão dos metais base. (a) Hardox 500 com revestimento. (b) Hardox 500 sem revestimento. (c) SAE 1010.

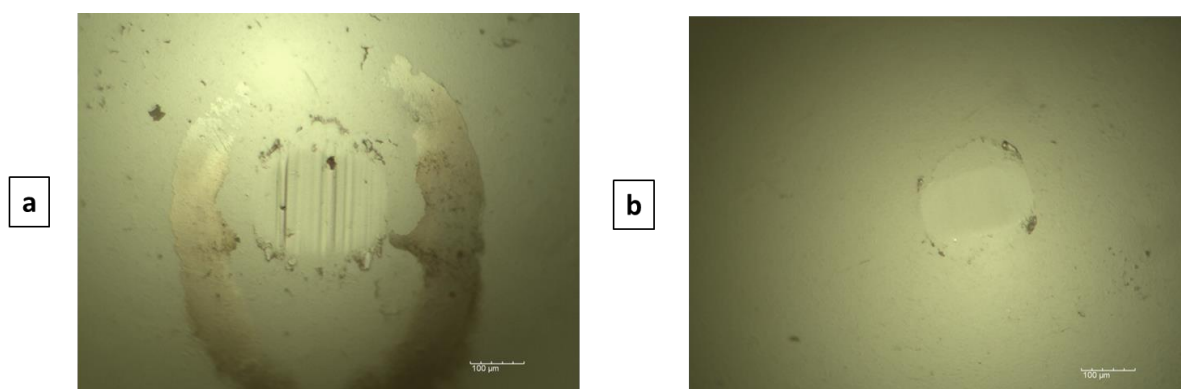


Figura D.2 – Imagem da esfera após utilização no ensaio de tribocorrosão das zonas afetadas pelo calor de menor dureza. (a) Similares. (b) Dissimilares.

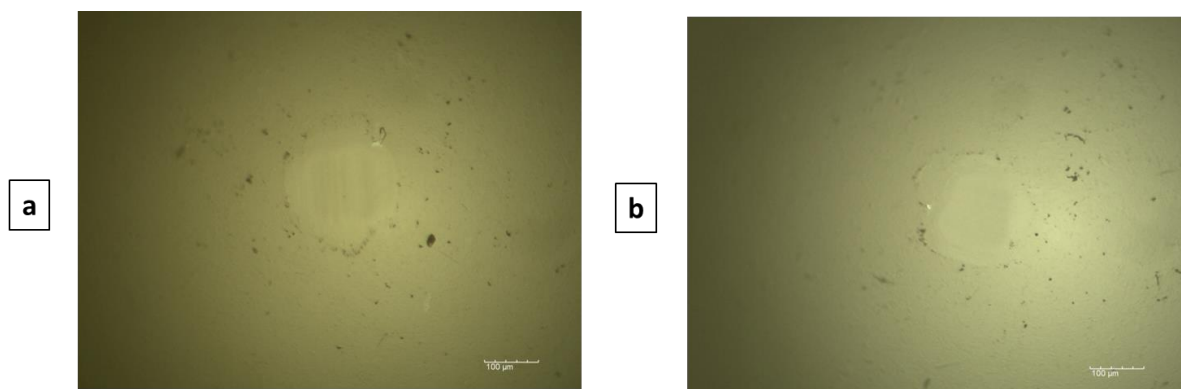


Figura D.3 – Imagem da esfera após utilização no ensaio de tribocorrosão dos metais de solda. (a) Similares. (b) Dissimilares.