

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Soldagem

Higor Ribeiro Oliveira

**ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE ENTRE TRÊS
REVESTIMENTOS DUROS DEPOSITADAS POR FCAW**

Belo Horizonte
2023

Higor Ribeiro Oliveira

**ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE ENTRE TRÊS
REVESTIMENTOS DUROS DEPOSITADAS POR FCAW**

Monografia de especialização
apresentada à Faculdade de Engenharia da
Universidade Federal de Minas Gerais, como
requisito parcial para a obtenção do título de
Especialista em Soldagem.

Orientador: Prof. Dr Ariel Rodriguez

Belo Horizonte

2023

| | |
|------|--|
| O48a | <p>Oliveira, Higor Ribeiro. Análise de resistência ao desgaste entre três revestimentos duros depositadas por FCAW [recurso eletrônico] / Higor Ribeiro Oliveira. - 2023. 1 recurso online (50 f.: il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Ariel Rodriguez Arias.</p> <p>“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”</p> <p>Bibliografia: f. 48-50. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Soldagem. 2. Desgaste mecânico. 3. Chapas de metal. 4. Revestimentos. I. Arias, Ariel Rodríguez. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.791</p> |
|------|--|

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Roseli Alves de Oliveira CRB/6 2121
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação
Curso de Especialização em Soldagem



ATA 09ª/2023 DA DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia 30 de novembro de 2023,, às 16:00 h, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: *ANÁLISE DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE ENTRE TRÊS REVESTIMENTOS HARDFACING DEPOSITADAS POR FCAW*

Aluno: HIGOR RIBEIRO OLIVEIRA – Matrícula: 2021662289

Local: Remotamente via plataforma "TEAMS".

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 30 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 40 minutos, é de parecer Favoravel à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 80 e com (com ou sem) sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias.

Assinaturas:

Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias
DEMEC/UFMG – Orientador

Prof. Dr. José Gedael Fagundes Júnior
UNESP - Avaliador

Prof. Mateus Codognotto Cunha
CEFET/MG - Avaliador

HIGOR RIBEIRO
OLIVEIRA:11097913643

Assinado de forma digital por HIGOR
RIBEIRO OLIVEIRA:11097913643
Data: 2023.12.07 12:10:21 -0300

Aluno: Higor Ribeiro Oliveira

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos e todos que me apoiaram nesta longa empreitada e realização de um mais um objetivo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de expressar minha sincera gratidão a Deus e a todos que contribuíram para o êxito nesta pós-graduação. cito aqui nominalmente os meus familiares, minha mãe Maria Eunice, meu pai Rubens Fernandes, meus irmãos Hugo, Camila, Carolina e, meu sobrinho Matheus. Agradeço imensamente ao meu orientador, Ariel Rodriguez, pela orientação excepcional e dedicação, e à minha família e amigos pelo apoio inestimável ao longo dessa jornada.

Aos colegas de laboratório, colaboradores e participantes do estudo, agradeço pelas valiosas contribuições que enriqueceram este trabalho e aqui gostaria de destacar o Mateus Codognotto. A UFMG e seu ambiente propício à pesquisa foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo. Por fim, agradeço ao e o Instituto SENAI Inovação de Engenharia de Superfície que disponibilizou parte da infraestrutura usada neste estudo.

Esta jornada foi desafiadora e recompensadora, e estou profundamente grato a todos que desempenharam um papel crucial. O apoio recebido fortaleceu meu compromisso com a pesquisa e contribuiu para o meu crescimento acadêmico e profissional. Mais uma vez, obrigado a todos por fazerem parte desta conquista.

“Das Utopia

Se as coisas são inatingíveis... ora!

Não é motivo para não querê-las...

Que tristes os caminhos, se não fora

A presença distante das estrelas!

Quintana, Mário”

RESUMO

O desgaste é um dos principais problemas encontrados na operação industrial gerando elevados custos devido a falhas de equipamentos, paradas inesperadas para manutenção e reposição constante de peças. Por meio da aplicação de tecnologias voltadas na redução do atrito e melhoria da resistência ao desgaste estas perdas podem ser reduzidas na indústria da mineração, cimenteira, sucroalcooleira e siderúrgica, por exemplo. Uma das soluções para reduzir as despesas com manutenção em ativos devido ao desgaste é a aplicação de chapas bimetalicas de alta resistência a abrasão. Dessa forma, objetivou-se investigar a microestrutura, a dureza e a resistência ao desgaste de duas ligas de revestimento duro hipereutéticas de ferro fundido branco com alto cromo dos sistemas Fe-C-Cr e Fe-C-Cr-B-Nb. Tais chapas são usadas na fabricação de chapas bimetalicas, depositadas pela técnica FCAW-S. Devido a diluição do metal de adição no metal de base, verifica-se variação da resistência ao desgaste da chapa em função da quantidade de camadas de solda depositadas. Logo, o presente trabalho também se propôs estudar resistência ao desgaste devido ao efeito da diluição por meio da avaliação da liga Fe-C-Cr-B-Nb com uma e duas camadas depositadas. Os resultados apontaram um melhor desempenho quanto ao desgaste da liga Fe-C-Cr-B-Nb frente a ligas Fe-C-Cr e um melhor desempenho do revestimento de duas camadas frente ao revestimento de uma camada.

Palavras-chave: fcaw; chapas bi-metálicas; revestimento duro; *reciprocating*; desgaste; dureza na profundidade.

ABSTRACT

Wear is one of the main issues encountered in industrial operations, leading to high costs due to equipment failures, unexpected downtimes for maintenance, and constant replacement of parts. Through the application of technologies aimed at reducing friction and improving wear resistance, these losses can be minimized in industries such as mining, cement, sugarcane-alcohol, and steel, for example. One solution to reduce maintenance expenses on assets due to wear is the application of high abrasion-resistant bimetallic plates. The objective was to investigate the microstructure, hardness, and wear resistance of two hyper-eutectic hardfacing alloys of white cast iron with high chrome from the Fe-C-Cr and Fe-C-Cr-B-Nb systems used in the manufacture of bimetallic plates deposited by the FCAW-S technique. Due to the dilution of the filler metal in the base metal, there is a variation in the wear resistance of the plate depending on the number of deposited welding layers. Therefore, this study also aimed to examine wear resistance due to the dilution effect by evaluating the Fe-C-Cr-B-Nb alloy with one and two deposited layers. The results indicated better wear performance for the Fe-C-Cr-B-Nb alloy compared to the Fe-C-Cr alloys and better performance for the two-layer coating compared to the single-layer coating.

Keywords: "FCAW"; reciprocating; wear; depth hardness.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 -Processo de Soldagem Flux Core Arc Weld – FCAW, (VILLANI ,2016). ... | 18 |
| Figura 2 – Seção transversal do arame tubular (Fonte:VILLANI ,2016)..... | 18 |
| Figura 3 -Tipos de mecanismos de desgaste (Fonte: DIN 50320, 1997) | 20 |
| Figura 4 - Modos de desgaste: (a) com abrasivo fixo (abrasão por dois corpos) e (b) com abrasivo solto (Fonte: STACHOWIAK; BATCHELOR, 2006) [12]. | 21 |
| Figura 5 - Variação das taxas de desgaste [$\text{mm}^2 / \text{m} \times 10^{-2}$] de aço AISI 1020. Abrasivo: SiC 250 μm (Trezona et al. 1999) [13]..... | 22 |
| Figura 6 - Mapa dos mecanismos de desgaste identificado no ensaio de micro-abrasão por via úmida, (a) dispersão com carbeto de silício com granulometria média de 3 μm e (b) dispersão de diamante com granulometria média de 3 μm (Fonte: Trezona et al. 1999)..... | 22 |
| Figura 7 – Figura esquemática do teste de desgaste na configuração pino sobre plano (Fonte: ASMT G133)..... | 24 |
| Figura 8 – Preparo dos corpos de prova. (a) Amostra de chapa soldada; (b) Chapas após corte por jato d’água; (c) Desenho técnico; (d) Corpo de prova retirada da chapa amostra, face de testes voltada para cima; (e) Corpo de prova retirada da chapa de amostra..... | 27 |
| Figura 9 - (a) Esquema da posição das trilhas de desgaste no corpo de prova; (b) Regiões das medida do volume de desgaste por perfilometria óptica. | 30 |
| Figura 10 - MAPA de elementar feito por EDS da interface da solda _ Substrato. | 31 |
| Figura 11 - Metalografia feita por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra 1010-4650 _ Magnificação 500x – elétrons secundários..... | 32 |
| Figura 12 – Micrografia feita por microscópio eletrônico de varredura das regiões mais próximas a superfícies (a) e da região mais próxima ao substrato (b), magnificação de 500x. | 33 |
| Figura 13 - MAPA elementar feito por EDS da região da interface entre o metal de base e metal de adição _ amostra liga A. | 34 |

| | |
|--|----|
| Figura 14 - MAPA elementar feito por EDS da região central do metal de adição _ amostra Liga A. | 35 |
| Figura 15 - MAPA elementar feito por EDS da região central do metal de adição _ Liga A. | 36 |
| Figura 16 – Metalografia feita por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra Liga B com 2 camadas _ Magnificação 500x – eletrôns. secundários. | 37 |
| Figura 17 – Micrografia da região próxima a superfície, magnificação de 1000x, região (a). | 38 |
| Figura 18 - MAPA elementar feito por EDS da região de interface entre o metal de adição e o substrato- liga B 1 passe. | 39 |
| Figura 19 - MAPA elementar feito por EDS da região central do metal de adição Liga B. | 40 |
| Figura 20 - MAPA elementar feito por EDS da região da superfície do metal de adição _ Liga B, 1 passe (a); 2 passes (b). | 41 |
| Figura 21 - Variação da microdureza média em relação a profundidade na seção transversal da liga A. | 42 |
| Figura 22 - Variação da microdureza média em relação a profundidade na seção transversal da liga B 2 passes. | 42 |
| Figura 23 - Variação da microdureza média em relação a profundidade na seção transversal da liga B, 1 passe. | 43 |
| Figura 24 – Microdureza média - ligas A e liga B 1 e 2 camadas. | 44 |
| Figura 25 - Perfilometria Óptica 3D da trilha de desgaste gerada durante o teste. | 45 |
| Figura 26 – Taxa de desgaste das amostras Liga A, Liga B 1 camada, Liga B 2 camadas e Metal de Base (MB). | 45 |

LISTA DE TABELA

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Composição química das ligas de estudo..... | 26 |
| Tabela 2 – Parâmetros de ensaio | 29 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 2. OBJETIVO | 17 |
| 2.1. Objetivo geral | 17 |
| 2.2. Objetivos Específicos..... | 17 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 18 |
| 3.1. Processo de soldagem por arame tubular – Flux Cored Arc Welding (FCAW)..... | 18 |
| 3.2. Revestimentos duros depositados por FCAW..... | 19 |
| 3.3. Tipos de desgaste | 19 |
| 3.4. Desgaste abrasivo..... | 20 |
| 3.5. Considerações sobre os ensaios de desgaste acelerado pino-sobre-plano | 23 |
| 4. MATERIAIS E METODOLOGIA..... | 26 |
| 4.1. Preparo de amostra | 26 |
| 4.1.1. Confeção dos corpos de prova..... | 26 |
| 4.1.2. Preparo dos corpos de prova para os testes tribológicos..... | 27 |
| 4.1.3. Preparo de amostra para as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV). | 27 |
| 4.2. Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura | 28 |
| 4.3. Análise de dureza na profundidade | 28 |
| 4.4. Análise de desgaste acelerado | 28 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 31 |
| 5.1. Metalografia..... | 31 |
| 5.2. Análise de microdureza..... | 42 |
| 5.3. Desgaste..... | 44 |

| | |
|---------------------------|-----------|
| 6. CONCLUSÃO | 47 |
| REFERÊNCIAS | 48 |

1. INTRODUÇÃO

O desgaste é um dos problemas inerentes à operação industrial, pois, toda superfície em movimento relativo entre si está sujeita a ele. Sendo assim seu estudo é fundamental uma vez que o desgaste gera elevados custos devido a falhas de equipamentos, paradas inesperadas para manutenção e reposição constante de peças. No Brasil, no ano de 2004, foram estimadas perdas econômicas devido ao desgaste de equipamentos na faixa entre 1 e 6% do PIB (SINATORA, 2005). Porém, foi demonstrada a eficácia em investimento na pesquisa aplicada na estudo do atrito e desgaste, com retornos financeiros de cerca de 40 vezes na mineração de carvão na China e de aproximadamente 64 vezes nos Estados Unidos (JOST, 1990). Também avaliou-se que os custos com o desgaste poderiam ser reduzidos em até 20% utilizando as tecnologias já existentes (JOST, 1990) e, que 50% dos problemas de desgaste presentes na indústria são causados por abrasão (EYRE, 1976).

Diante disso, estudos têm focado em encontrar o material mais adequado para cada ambiente e, buscado melhorar a resistência ao desgaste dos materiais. Estes estudos também levam em consideração outras propriedades como a tenacidade à fratura e a resistência à corrosão, também importantes dependendo da aplicação. No setor da mineração, as perdas econômicas devido ao atrito e desgaste totalizam o valor de 210 milhões de Euros anualmente, sendo que aproximadamente um terço deste valor corresponde à manutenção dos equipamentos de extração (HOLMBERG *et al.*, 2017). Estima-se que por meio da aplicação das novas tecnologias voltadas na redução do atrito e desgaste na indústria da mineração, estas perdas podem ser reduzidas em 15% em período de 10 anos e em 30% no período de 20 anos (HOLMBERG *et al.*, 2017).

Um das técnicas para reduzir as despesas com manutenção em ativos de mineração devido ao desgaste é a aplicação de chapas bimetálicas de alta resistência a abrasão (PRADEEP *et al.*, 2010). Tais chapas, possuem um substrato de aço carbono e são revestidas por aço alta liga com grande fração volumétrica de carboneto de altíssima dureza. Geralmente estas chapas são depositadas pela técnica FCAW, uma vez que, esta técnica permite a deposição de grande quantidade de material, boa qualidade da solda e facilidade da adição de elementos de liga (LEITE, MARQUES, 2010). Porém, é intrínseco a esta técnica a ocorrência da diluição do metal de adição no metal de base. Tal fato juntamente com variáveis de processo como aporte térmico, taxa de resfriamento, entre outros colaboram para

heterogeneidade na microestrutura do revestimento depositado. Este fator leva a efeitos deletérios as propriedades mecânicas e tribológicas do revestimento.

Tendo em vista o exposto, o pretende estudo se propôs a caracterizar a microestrutura e a variação da taxa de desgaste de duas ligas comercial. No estudo também foi analisado e discutido os efeitos metalúrgicos e da dureza na taxa de desgaste obtida experimentalmente.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Caracterizar a microestrutura e a variação da taxa de desgaste de duas ligas comercial depositados pela técnica FCAW em função da espessura da chapa.

2.2. Objetivos Específicos

- Estudar a microestrutura das ligas Fe-C-Cr e Fe-C-Cr-B-Nb;
- Determinar o perfil de dureza em função da profundidade das ligas estudadas e comparar os resultados entre elas;
- Comparar a resistência a abrasão entre as ligas de Fe-C-Cr e Fe-C-Cr-B-Nb;
- Avaliar a influência da diluição na resistência a abrasão;
- Avaliar a resistência a abrasão entre a liga depositadas Fe-C-Cr-B-Nb com um passe e dois passes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Processo de soldagem por arame tubular – Flux Cored Arc Welding (FCAW)

O processo de soldagem por arame tubular (FCAW) promove a fusão dos materiais a serem soldados por meio do calor gerado pelo arco elétrico estabelecido entre o arame tubular (metal de adição -MA) e a peça (metal de base - MB). Neste processo o arame é continuamente consumido e depositado dentro de um chanfro ou sobre um substrato (VILLANI *et al.*,2016), conforme apresentado na Figura 1.

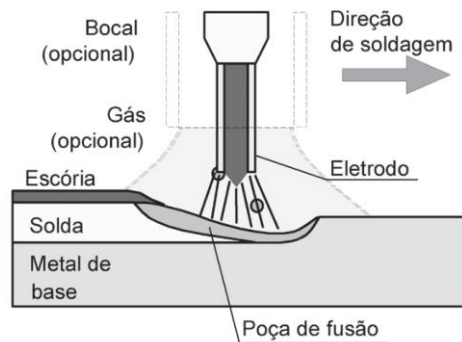


Figura 1 -Processo de Soldagem Flux Core Arc Weld – FCAW, (Fonte: VILLANI *et al.*,2016).

O principal diferencial deste processo entre os demais processos de soldagem reside no fato que o arame usado é em formato de tubo e o seu interior é preenchido com fluxo. As suas principais funções são liberar gases capazes de promover a proteção da poça de fusão e estabilizar o arco-elétrico, escoridificar as impurezas, além de conter elementos que são incorporados no cordão de solda. Estes elementos têm a finalidade de suplementar o cordão com elementos de ligas e assim atribuir mais propriedades a solda ou então simplesmente aumentar a taxa de deposição (VILLANI *et al.*,2016). A Figura 2 apresenta a seção transversal de um arame tubular.

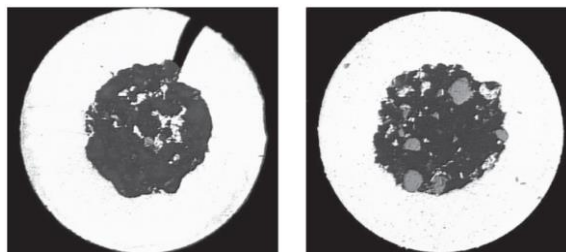


Figura 2 – Seção transversal do arame tubular (Fonte:VILLANI ,2016).

Normalmente o fluxo contido no arame tubular equivale a 30% da sua massa, podendo a chegar até valores de 50% para arames especiais. Devido a presença do fluxo e o fato de

geralmente não serem revestidos, estes arames normalmente são armazenados sob condições especiais para evitar a corrosão atmosférica e a absorção de umidade por parte do fluxo (VILLANI *et al.*, 2016; HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017).

O fluxo interno dá ao processo FCAW certas vantagens em comparação a processos que não usam de fluxo. Este último ponto é fortemente explorado no seu uso para deposição de revestimentos duros.

3.2. Revestimentos duros depositados por FCAW

Conforme mencionado anteriormente, o desgaste é um fenômeno regular a todos os componentes em operação e, uma vez existente, não há meios capazes de evitá-lo. Tendo em vista que impedir o desgaste é virtualmente impossível, a melhor solução para lidar com ele é por meio de métodos de emprego de novos materiais capazes de mitigá-lo (PRADEEP *et al.*, 2010). Sendo assim, um meio para reduzir o desgaste é com o uso de revestimento. Existem vários tipos de revestimento que se diferenciam de acordo com o tipo de material e forma de aplicação. Neste trabalho iremos investigar mais a fundo os revestimentos denominados revestimentos duros. Estes revestimentos são produzidos pela deposição de uma liga metálica especial de alta dureza por meio da aplicação de cordões de solda sobre chapa.

O revestimento duro pode ser aplicado por vários processos de soldagem, por exemplo, arco-submerso, arame tubular, entre outros. Já quanto a escolha do processo de deposição dependerá de fatores como: local de trabalho (em campo ou em fábrica), função do componente, composição do metal base, tamanho e forma do componente, estado de reparo do componente degradado, número de itens iguais ou similares a serem revestidos, entre outros (PRADEEP *et al.*, 2010; (LEITE, MARQUES, 2010). Dentre os vários processos de soldagem usados para a deposição de revestimentos duros o arame tubular é bastante empregado devido a sua produtividade e flexibilidade de aplicações em campo e principalmente pela factibilidade de inserção de elementos de liga no fluxo presente no centro do arame.

3.3. Tipos de desgaste

Desgaste é definido como a perda progressiva ou deslocamento de material de uma superfície devido ao movimento relativo desta com outra superfície (HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017). O desgaste provoca alterações nas geometrias e/ou dimensões de componentes, causando vibrações, folgas indesejadas, perda de precisão e movimentos irregulares que comprometem o desempenho dos equipamentos e levam a falha prematura

(HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017). O volume e os mecanismos de desgaste dependem da situação em que as superfícies atritando estão submetidas, como a força normal, propriedades mecânicas, temperatura no contato, velocidade de deslizamento, tempo de desgaste, dentre outras variáveis (KATO, ADACHI, 2001)

A norma DIN 50320 divide os mecanismos de desgaste em 4 tipos, estes são: a adesão, a abrasão, a fadiga de contato e o mecanismo triboquímico (oxidação/corrosão), ilustrados na Figura 3.

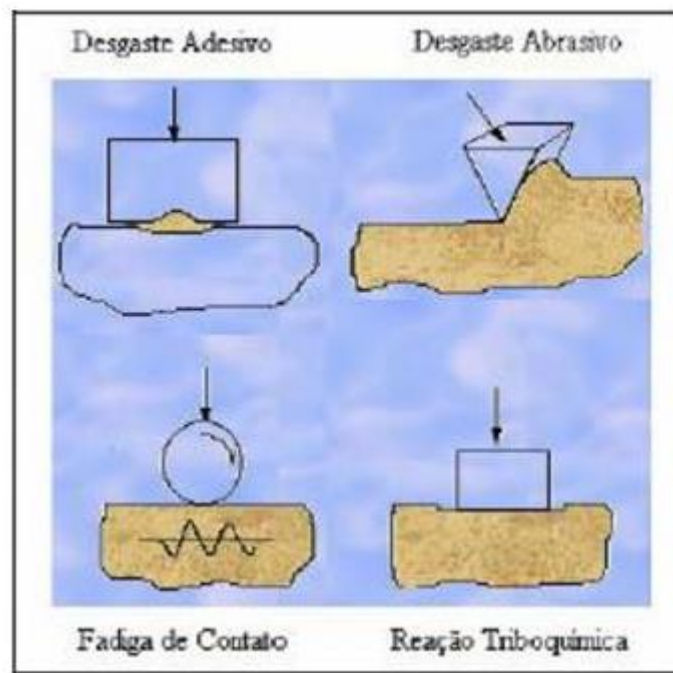


Figura 3 -Tipos de mecanismos de desgaste (Fonte: DIN 50320, 1997)

Dentre estes diferentes mecanismos de desgaste, o mais importante a ser considerado para este trabalho é o desgaste abrasivo, especialmente por ser o mecanismo de desgaste mais presente no setor de mineração um dos setores em que mais se faz uso dos revestimentos duros. Por este motivo, o mecanismo de desgaste abrasivo será mais detalhado nas sessões a seguir.

3.4. Desgaste abrasivo

No desgaste abrasivo, ocorre a remoção ou deslocamento do material de uma superfície por partículas duras, ou protuberâncias no contra corpo (HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017). A norma AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G40-15: Standard terminology relating to wear and erosion subdivide o desgaste abrasivo em dois mecanismos principais: o desgaste abrasivo por dois corpos e o desgaste

abrasivo por três corpos. A Figura 4 ilustra de forma esquemática estes dois tipos diferentes de mecanismos de desgaste abrasivo.

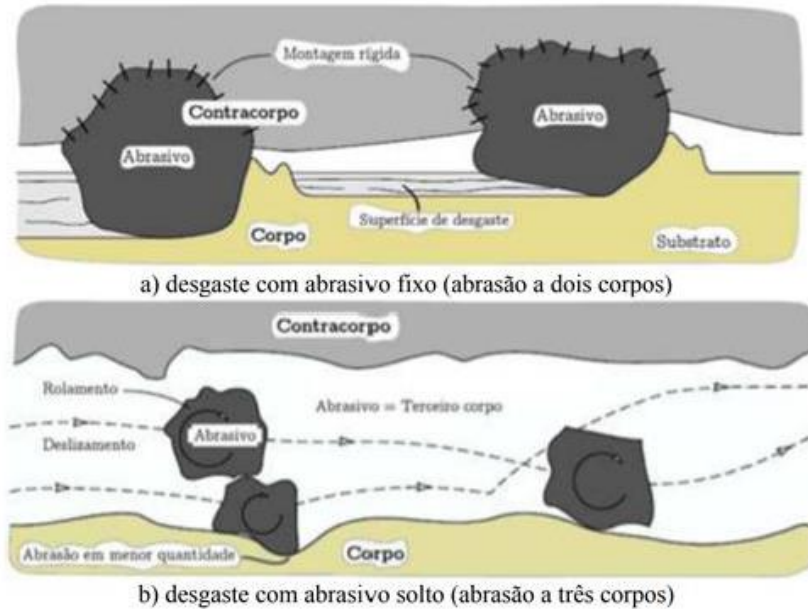


Figura 4 - Modos de desgaste: (a) com abrasivo fixo (abrasão por dois corpos) e (b) com abrasivo solto (Fonte: STACHOWIAK; BATCHELOR, 2006).

Ao observar a imagem da Figura 4 é possível verificar que a diferença entre os dois tipos de desgaste deve-se às características do deslocamento do abrasivo. No desgaste abrasivo por riscamento, a partícula abrasiva adere no contra corpo e desta forma há deslocamento relativo entre eles e, portanto o contato é considerado como dois corpos, Figura 4(a) (HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2006). No caso do desgaste por rolamento, o contato ocorre por três corpos, ou seja, o abrasivo pressionado pelo contra corpo rola sobre a superfície de contato causando danos na mesma, Figura 4(b) (HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2006). A atuação destes dois mecanismos impacta diretamente na taxa de desgaste, sendo o desgaste por riscamento em geral mais severo que o por rolamento para as mesmas condições de desgaste (GATES, 1998).

Com relação à nomenclatura dos modos de desgaste abrasivo, há sugestões para que os termos 'desgaste abrasivo por riscamento' e 'desgaste abrasivo por rolamento' sejam adotados para a descrição dos mecanismos de desgaste em substituição dos termos 'desgaste abrasivo de dois corpos' e 'desgaste abrasivo de três corpos'. Isto deve-se para evitar interpretações contraditórias dos últimos termos na literatura e a fim de produzir o entendimento totalmente inequívoco (Trezona *et al.*, 1999).

A Figura 5 apresenta a taxa de desgaste do aço AISI 1020 em função da carga aplicada, nela é possível identificar o grau de severidade causada pelo contato por dois corpos (marcador branco) em comparação ao desgaste abrasivo por três corpos (marcador preto) [13].

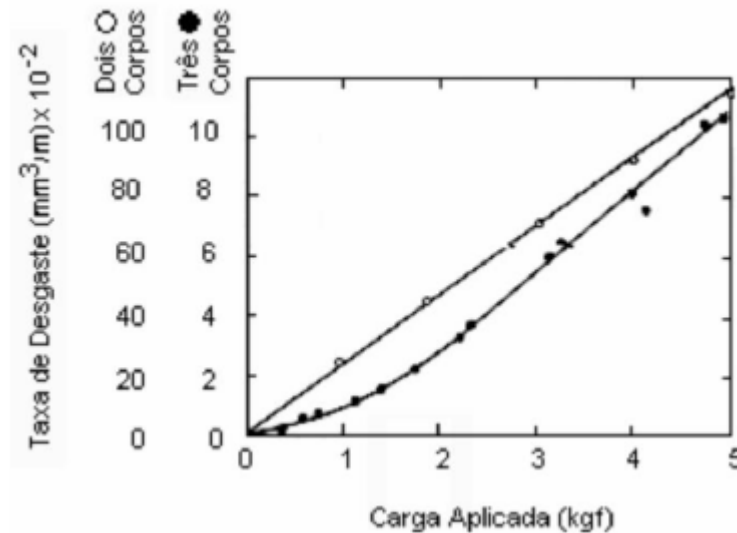


Figura 5 - Variação das taxas de desgaste [$\text{mm}^2/\text{m} \times 10^{-2}$] de aço AISI 1020. Abrasivo: SiC $250\mu\text{m}$ (Fonte: Trezona *et al.*, 1999).

Os dois modos de desgaste são comumente identificados simultaneamente em corpos que sofreram abrasão. A Figura 6 apresenta os mapas de mecanismos de desgaste em função da variação da carga normal e da concentração de abrasivo. Nela identifica-se que quanto maior a carga normal e menor a fração de abrasivo da dispersão maior a tendência da ocorrência de desgaste abrasivo por riscamento, já o inverso é identificado ao reduzir a carga e aumentado a concentração do abrasivo. Este fenômeno é identificado independente da dureza do abrasivo e para os mesmos materiais metálicos de estudo (Trezona *et al.*, 1999).

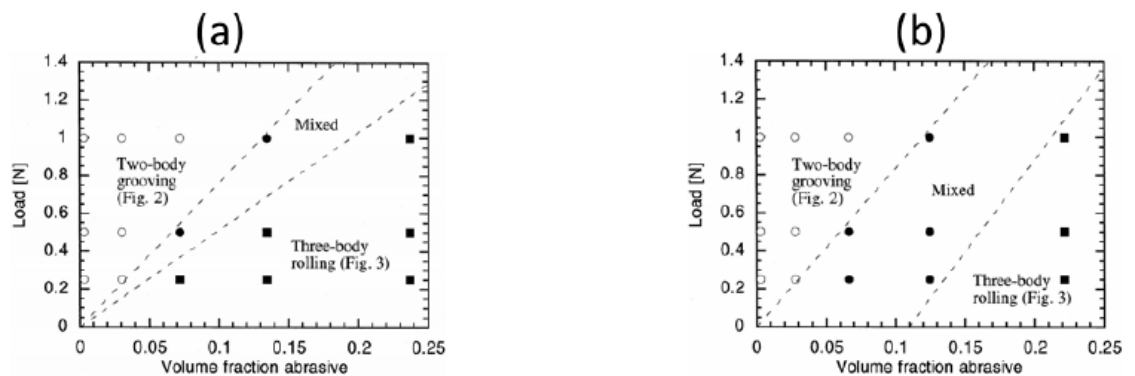


Figura 6 - Mapa dos mecanismos de desgaste identificado no ensaio de micro-abrasão por via úmida, (a) dispersão com carbeto de silício com granulometria média de $3\mu\text{m}$ e (b) dispersão de diamante com granulometria média de $3\mu\text{m}$ (Fonte: Trezona *et al.* 1999).

3.5. Considerações sobre os ensaios de desgaste acelerado pino-sobre-plano

O comportamento do desgaste é um fenômeno complexo, envolvendo dois ou mais corpos, um ou mais materiais, e dependente de uma ampla gama de fatores, como movimento, carregamento e ambiente (HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017; ZUM GAHR, 1998). Um material pode se desgastar por diferentes mecanismos em diferentes situações e diferentes materiais podem se desgastar por diferentes mecanismos na mesma situação de desgaste (Trezona *et al.*, 1999). Desgaste de uma superfície ou corpo também pode ser influenciado pelo desgaste do outro corpo de contato. Como resultado, o comportamento de desgaste, ou simplesmente desgaste, é melhor visto como uma propriedade do sistema, não uma propriedade material (HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017; ZUM GAHR, 1998). O grupo de elementos que afetam o comportamento de desgaste é chamado de tribossistema. Devido a esta natureza complexa do desgaste, o principal elemento envolvido na seleção de um teste de desgaste para uma aplicação é a simulação do tribossistema da aplicação no teste de desgaste (ASTM G190-15,2015). Outro elemento da metodologia de selecionar um teste de desgaste é a aceleração dos resultados de desgaste, que é relacionado com a consideração de simulação (ASTM G190-15,2015).

Tendo isto em vista, é importante que o teste de desgaste usado no estudo seja selecionado levando em consideração os parâmetros aqui citados e tenha um rigoroso sistema de controle deles. A taxa de desgaste e o atrito dependem das condições de deslizamento onde até mesmo alterações aparentemente pequenas podem levar a mudanças radicais no mecanismo dominante e conseqüentemente na taxa de desgaste. Por isto, é necessário que seja feita uma escolha cuidadosa dos parâmetros e configuração de teste, tais escolhas juntamente com controle e monitoramento rigorosos dos ensaios são essenciais para que os resultados de um teste sejam úteis para fins científicos (HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017).

Pelas razões expostas acima, este estudo optou pelo uso de ensaio de desgaste acelerado na configuração pino sobre plano, também conhecido como *reciprocating*. Uma vez que este teste possibilita monitorar e controlar as variáveis de ensaio, é de fácil realização e promove um desgaste apreciável no corpo de prova dentro do tempo de teste.

O teste de desgaste pino-sobre-plano consiste na realização do desgaste por meio do movimento relativo entre uma superfície plana e um pino (HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017; ASTM G 133-05, 2016). A direção do movimento entre superfícies deslizantes reverte de forma periódica tal que o deslizamento oscile para frente e para trás em linha reta. Este método de teste pode ser aplicado tanto para tribossistemas lubrificados quanto para não

lubrificados (ASTM G 133-05, 2016). A Figura 7 apresenta o esquema de funcionamento do ensaio de desgaste pino sobre plano, conforme descrito acima.

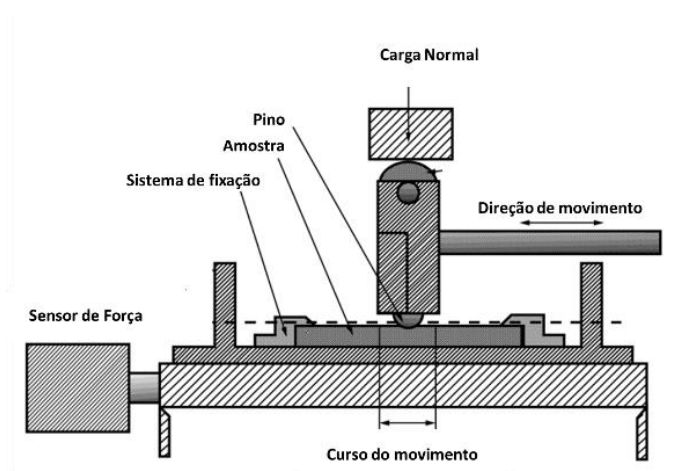


Figura 7 – Figura esquemática do teste de desgaste na configuração pino sobre plano (Fonte: ASMT G133-05, 2016).

A quantificação do desgaste durante o teste pode ser realizada por meio de várias técnicas, como: perda de massa, perda ou deslocamento de volume, largura ou profundidade da trilha de desgaste, medidas geométricas e medidas indiretas, como o tempo necessário para desgastar um revestimento ou a carga necessária para causar desgaste severo ou alteração na refletância da superfície. Para selecionar qual o parâmetro será usado para a quantificação do desgaste se baseia no tipo das amostras de desgaste, importância para uma aplicação, e técnicas disponíveis (ASTM G190-15, 2015).

Para grandes quantidades de desgaste, medição de perda de massa é adequado, porque é simples e balanças geralmente estão disponíveis. No entanto, a medição da perda de massa tem três limitações principais. (i) Primeiro, se os materiais testados diferirem em densidade, a perda de peso não fornece uma classificação verdadeira entre eles. (ii) Em segundo, o desgaste está relacionado também ao volume de material deslocados, mas esta medida não contabiliza desgaste por deslocamento de material, deformação plástica. (iii) Por fim, nos casos que há transferência de massa do contra corpo para a amostra, pode haver ganho peso. Portanto, a medição da perda de massa é válida apenas quando as densidades do material são as mesmas e quando não ocorre deslocamento e transferência de material (ASTM G190-15, 2015).

Já a medida do volume de desgaste apesar de corresponder uma medida direta do desgaste frequentemente é difícil de medir. Isto, pois, a determinação da profundidade do desgaste é complexa e demorada. Por este motivo em muitos trabalhos são adotadas medidas

apenas da largura da trilha desconsiderando a profundidade de desgaste. No entanto, a aplicabilidade deste tipo de medição é limitada a cada geometria de teste específico. Porém, em caso de geometrias não tão complexas, como a trilha de desgaste gerada no ensaio pino sobre plano, a medida da profundidade de desgaste se torna mais simples (ASTM G190-15, 2015).

Por este motivo, neste trabalho foi adotado a medida do volume de desgaste como o meio para mensurar o desgaste produzido no teste. Tal opção foi adotada, pois, conforme descrito ela é capaz de proporcionar uma medida direta do desgaste e, uma vez que, a trilha de desgastado ensaio pino-sobre-plano é consideravelmente simples, a medida por meio da técnica de perfilometria 3D se tornou factível. Dos resultados de volume de desgaste mesurados por perfilometria 3D foi determinado a taxa de desgaste dos materiais no teste.

4. MATERIAIS E METODOLOGIA

4.1. Preparo de amostra

4.1.1. Confeção dos corpos de prova.

Para a realização dos experimentos foram selecionadas 3 chapas de desgaste fornecidas pela Eutectic Castolin. Duas com espessura de 20 mm (10mm metal de base, mais 10mm de metal de adição) uma com deposição da liga A e outra com deposição da liga B. Já a terceira chapa com 13 mm de espessura (5mm de metal de base mais 8mm de metal de adição) com deposição da liga B somente. Portanto o presente trabalho teve como objeto de estudo três amostras denominadas: Liga A 2 camadas; Liga B 2 camadas e; liga B 1 camada. A composição química das ligas consta na Tabela 1. As quatro chapas foram depositadas pela Eutectic Castolin utilizando a técnica FCAW, os parâmetros de deposição não serão tratados neste trabalho, pois, estes fazem parte do know-how da empresa e por tal motivo ficarão em sigilo.

Tabela 1 - Composição química das ligas de estudo.

| Elemento | Substrato: (ASTM A36) | Liga A | Liga B |
|----------|-----------------------|--------|--------------|
| C | 0,26% (MAX) | 5,0% | C 4.0 a 5.5% |
| Si | 0,4% (MAX) | 0,78% | < 2% |
| B | N/A | N/A | 0,4 a 0,8% |
| S | 0,05% (MAX) | N/A | < 0,03% |
| P | 0,04% (MAX) | 0.025% | 0.025% |
| Cr | N/A | 28,2% | 15,0 a 20,0% |
| Mn | N/A | 0,95% | < 2% |
| Nb | N/A | N/A | 1,0 a 2,5% |
| W | N/A | N/A | N/A |
| Fe | Bal. | Bal. | Bal. |

As chapas fornecidas, Figura 8 (a), foram cortadas com auxílio da máquina de corte CNC por jato d'água, Figura 8 (b), em retângulos iguais nas dimensões 43,3x30,6, Figura 8 (c). A Figura 8 (d) e (e) apresentam os corpos de prova extraídos da chapa.

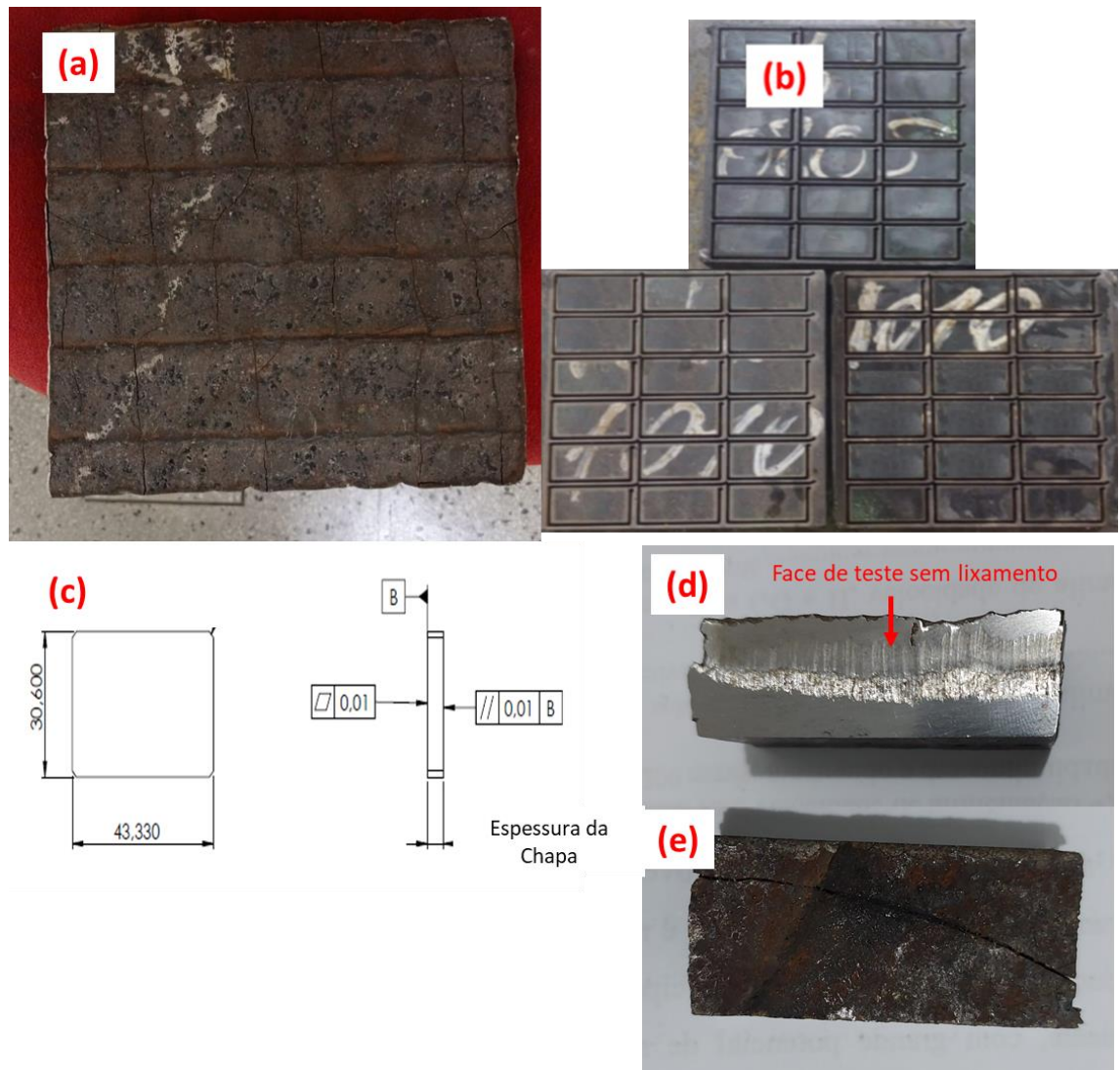


Figura 8 – Preparo dos corpos de prova. (a) Amostra de chapa soldada; (b) Chapas após corte por jato d’água; (c) Desenho técnico; (d) Corpo de prova retirada da chapa amostra, face de testes voltada para cima; (e) Corpo de prova retirada da chapa de amostra.

4.1.2. Preparo dos corpos de prova para os testes tribológicos.

Após corte, todos os corpos de prova foram fresados a fim de garantir a planicidade das face. Posteriormente foram retificados e, lixados com lixa 300# e 600#.

Antes e depois dos testes tribológicos todos os corpos de prova ensaiados passaram pelo processo de limpeza por meio de banho ultrassônico em duas etapas: (i) imersão em álcool por 10 minutos e após; (ii) imersão em acetona também por 10 minutos.

4.1.3. Preparo de amostra para as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Para a avaliação microestrutural por MEV e química por Espectrometria de energia dispersiva (EDS), foi necessário realizar o embutimento dos corpos de prova com resina

condutora. Posteriormente as amostras foram lixadas e polidas na sequência: 300#, 600#, 1200#, 2000#, dispersão de alumina com 1 μm e por fim pasta de diamante com 1/4 μm .

4.2. Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens de metalografia feitas na seção transversal foram adquiridas por meio do equipamento microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca JEOL/JSM, Modelo IT100 com tensão máxima de aceleração de 20 kV, acoplado ao detector de energia dispersiva de raios X do mesmo fabricante. As magnificações utilizadas constam no rodapé das imagens. O modo de aquisição das imagens utilizado foi por elétrons secundários e por elétrons retro espalhados.

Sobre a seção transversal, foram consideradas 4 regiões de análises: metal de base (MB), interface metal de base com metal de adição (interface), região central do metal de adição (CMA) e por fim na região mais próxima a superfície do cordão de solda (MA).

4.3. Análise de dureza na profundidade

As medidas de microdureza Vickers na profundidade foram realizadas com o auxílio do equipamento microdurômetro, marca SHIMADZU, modelo HMV-2T, com carga de 2,942 N e tempo de indentação de 5 segundos. No presente estudo foi determinado a microdureza segundo a norma ISO 14577-1 *Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters*.

Neste trabalho as microindentações foram realizadas na seção transversal das amostras ao longo da profundidade do material de acordo com a norma DIN 50-190 _ *Hardness Depth of Heat Treated Parts*. Desta forma foi avaliado a diferença de dureza entre o metal de adição e do metal de base avaliando a influência da diluição nesta propriedade. Foram realizadas indentações a cada 0,5mm a partir da superfície até ultrapassar a linha de fusão na interface entre metal de base (substrato) e revestimento.

De cada material apenas um corpo de prova foi analisado e sobre cada um dos materiais analisados foram realizados três linhas de medições de dureza sendo todas elas equidistantes entre si e as médias das microdureza dos pontos foi considerada.

4.4. Análise de desgaste acelerado

Os testes de desgaste acelerado foram realizados no laboratório de tribologia do CIT SENAI, com o auxílio do equipamento Tribômetro Universal UMT, da marca: Bruker. Eles foram realizados na configuração pino sobre plano (*reciprocating*), a seco e condições

ambientais de laboratório (20°C+1, 45%+10%) de acordo com a norma ASTM G 133 - *Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear*. Os parâmetros de testes selecionados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de ensaio

| Variável | Mensurado |
|-------------------------|--------------------|
| Fornça normal | 40N |
| Frequência de oscilação | 5Hz |
| Comprimento da trilha | 10mm |
| Tempo de ensaio | 3600 s |
| Diâmetro da esfera | 6,35 mm |
| Material da Esfera | Nitreto de silício |

O equipamento conta com células de carga e um sistema de aquisição contínuo capaz de medir on-time as forças normal e de atrito e assim determinar o coeficiente de atrito durante todo o teste.

Conforme descrito anteriormente, o método usado para mensurar o desgaste foi por meio da medida do volume de material desgastado, para tal, empregou-se o equipamento perfilômetro óptico GTK, da marca: Bruker. A realização desta medida foi efetuada com o laser branco e com magnificação de 20x. Sobre cada trilha foram realizadas 3 medidas, no início, meio e fim da trilha de desgaste, de acordo com a imagem da Figura 9. Sobre cada uma das medidas foram extraídos a área da seção transversal e o volume de desgaste foi calculado pelo produto da média da área mensurada dos três pontos pelo comprimento da trilha realizada no tribômetro.

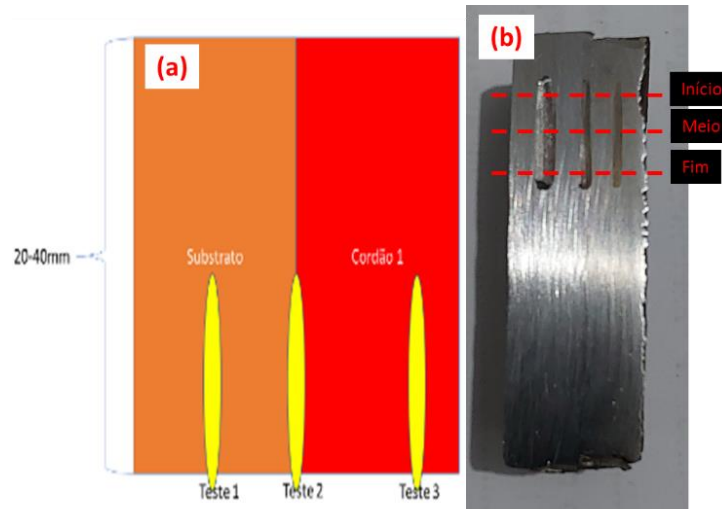


Figura 9 - (a) Esquema da posição das trilhas de desgaste no corpo de prova; (b) Regiões das medida do volume de desgaste por perfilometria óptica.

A equação 1 apresenta o cálculo para determinar o volume de desgaste, onde: Q = volume de desgaste; A_t = área transversal; c = comprimento da trilha de desgaste.

$$Q = A_t * c \quad (1)$$

Já a taxa de desgaste foi determinada seguindo a equação Archard apresentada pela equação 2 (HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017). Na qual: k = taxa de desgaste; F_n = Força normal; d = distância total percorrida durante o ensaio.

$$k = \frac{Q}{d * F_n} \quad (2)$$

Para a avaliar o desempenho ao desgaste foram realizados testes de desgaste na seção transversal das amostras, conforme esquematizado na Figura 9. Foi realizado um teste sobre o metal de base e, um teste sobre o metal de adição.

Em todos os corpos de prova foram realizados testes em triplicada. Para este estudo foi considerado apenas as médias dos valores medidos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Metalografia

A fim de se realizar a caracterização microestrutural das ligas de estudo foi empregado a microscopia eletrônica de varredura. Tal uso deve-se a maior capacidade de magnificação e resolução da técnica e a possibilidade de utilizar o espectrômetro de energia dispersiva (EDS) acoplado ao equipamento que permite caracterização química semiquantitativa.

A Figura 10 apresenta a metalografia e os mapas de EDS feitos do substrato. Os resultados semi-quantitativos apresentados na Figura 10 corroboram com os dados de composição química esperada para o substrato, já na metalografia pode-se constatar a presença de ferrita com alguns grãos de perlita.

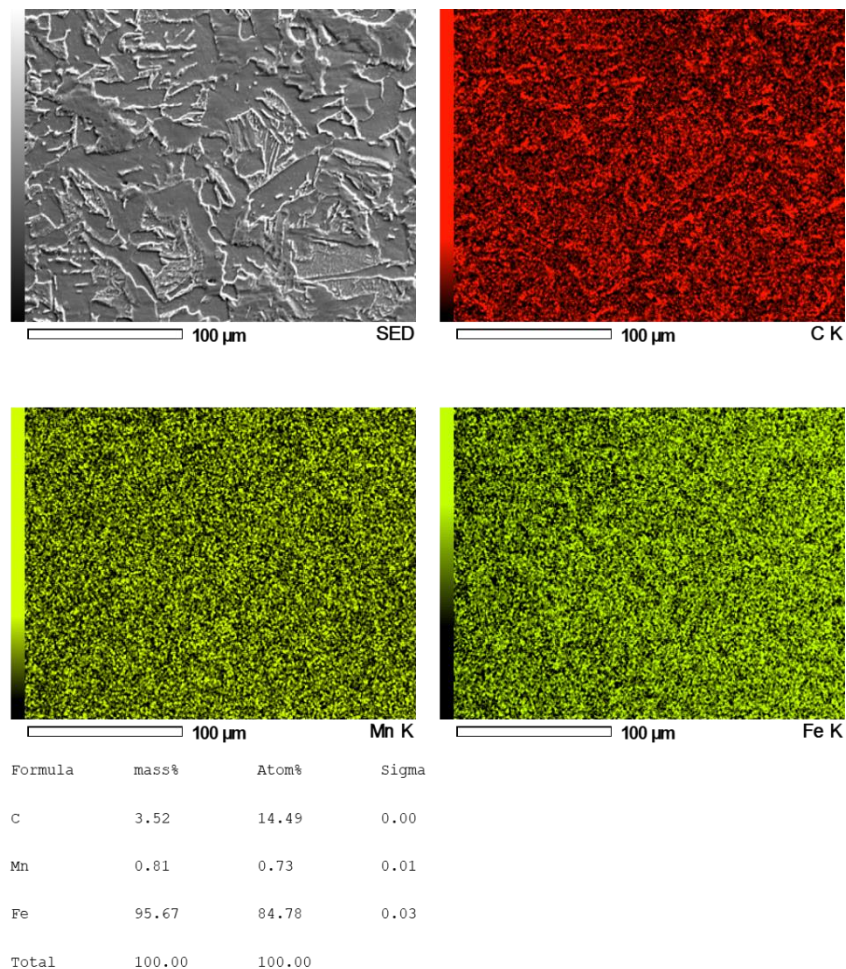


Figura 10 - MAPA de elemental feito por EDS da interface da solda _ Substrato.

Na Figura 11 apresenta as metalografias do corpo de prova da amostra da liga A. Em que: (a) apresenta a superfície do revestimento (MA); (b) a região central; (c) a interface entre revestimento e metal de base e; (d) é o metal de base (MB).

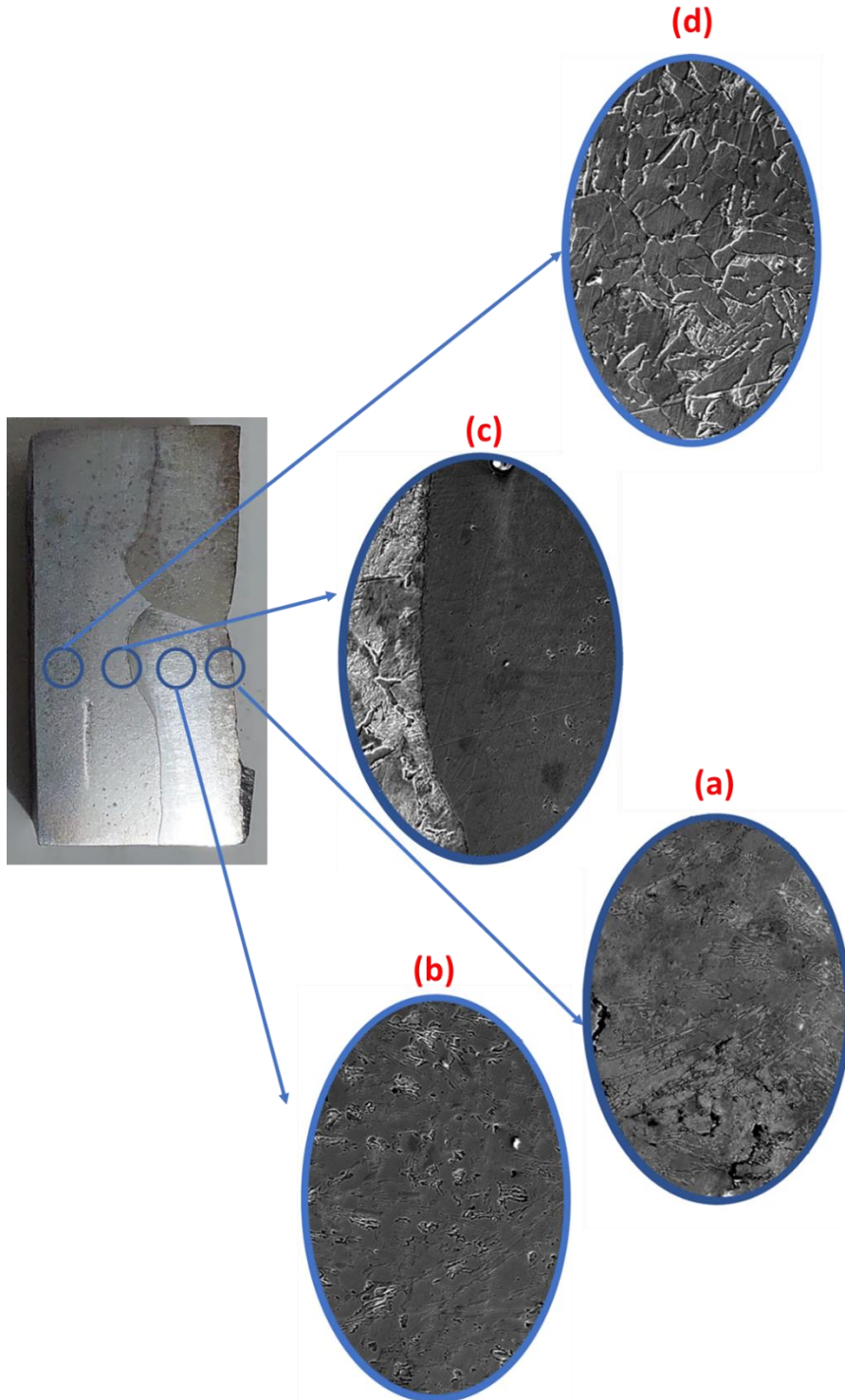


Figura 11 - Metalografia feita por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra 1010-4650 _ Magnificação 500x – elétrons secundários.

A Figura 12 apresenta a região mais próxima da superfície (a) e, a região próxima do substrato (b), com maior magnificação em comparação com a Figura 11. Na imagem (a) é verificável a presença de carbonetos poligonais e prismáticos de ferro e cromo (áreas claras) envoltos por matriz ferrosa de constituinte eutético formado por carbonetos de Fe-Cr, austenita e martensita (áreas escuras) (LEITE, VILLANI, 2016). A estrutura na superfície se mostra do tipo hipereutética.

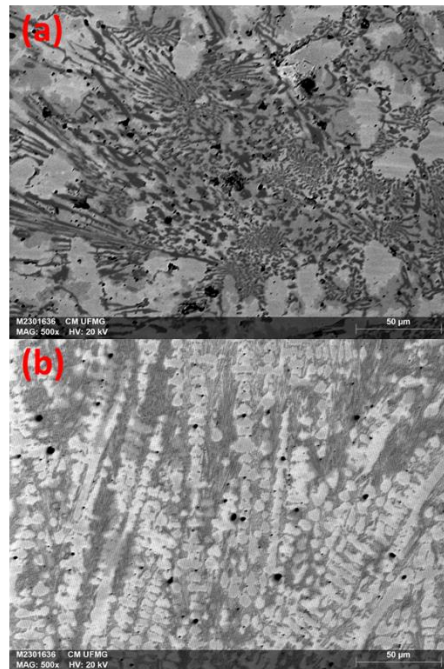


Figura 12 – Micrografia feita por microscópio eletrônico de varredura das regiões mais próximas a superfícies (a) e da região mais próxima ao substrato (b), magnificação de 500x.

Já Figura 12 (b) é evidenciado o crescimento dendrítico dos carbonetos de Cr partindo do substrato em direção a superfície do revestimento.

Codognotto (2018) também estudou a resistência a abrasão de revestimentos duros com ligas de Fe-Cr-C depositadas por FCAW sobre chapas de aço A36. Em suas avaliações de microestruturais foi verificado que neste revestimento a presença de austenita, ferrita e de carbonetos: M₂₃C₆; Fe₃C e M₇C₃ [20].

A Figura 13, Figura 14, Figura 15 apresentam os mapas de EDS das três regiões de estudo do revestimento, interface, CMA e MA respectivamente. Tais imagens exibiram mais evidências acerca da microestrutura do material avaliado.

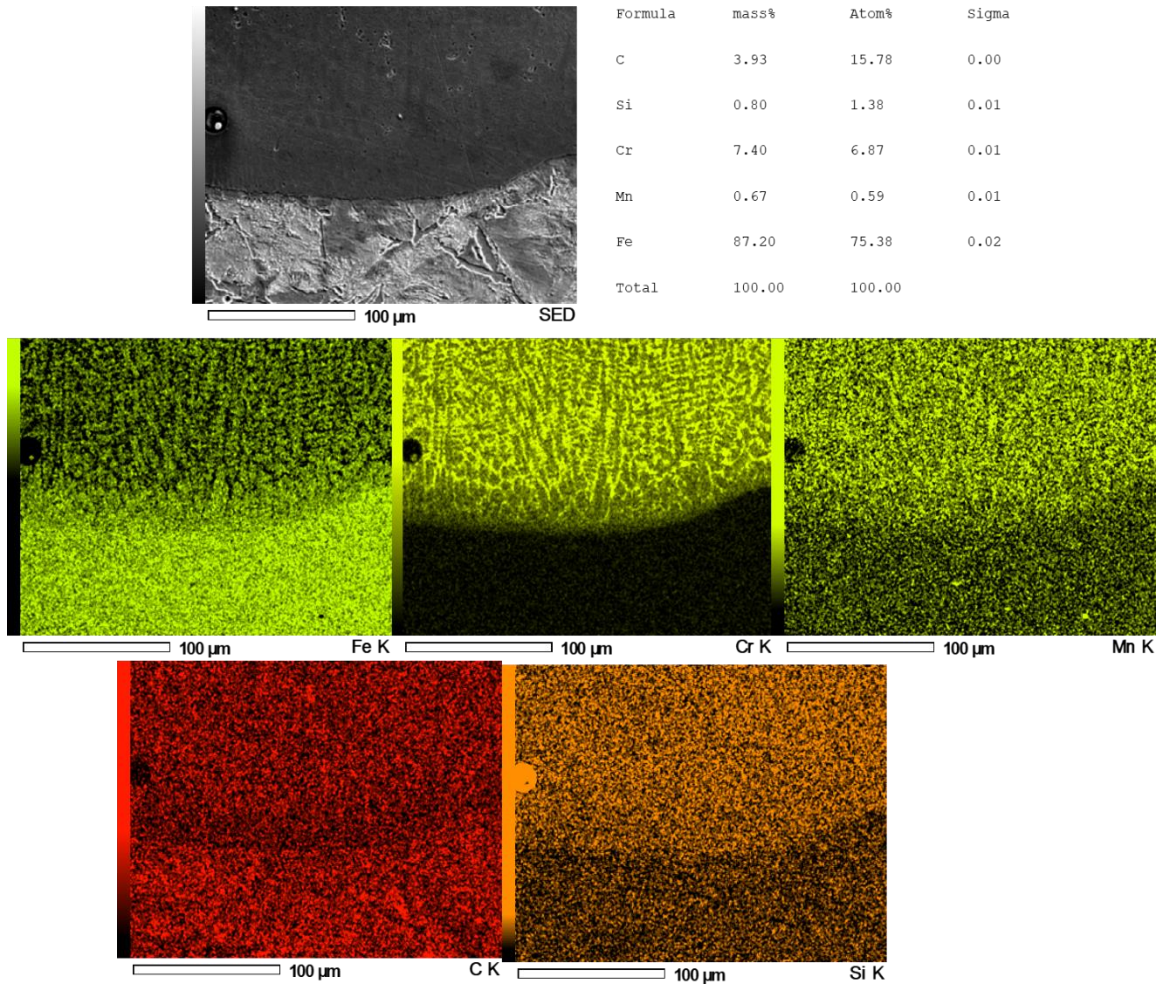


Figura 13 - MAPA elemental feito por EDS da região da interface entre o metal de base e metal de adição _ amostra liga A.

Nas imagens da Figura 13 destacam-se as análises dos mapas de cromo e ferro, isto, pois, ao avaliarmos percebe-se que a presença do cromo está nas posições inversas ao do ferro e vice-versa. Por isso é possível inferir que o cromo não se encontra em solução com ferro, ou seja, há o crescimento de duas fases, uma rica em cromo e outra em ferro. Conforme avaliado por Pacheco (2018) e Codognotto (2018), trata-se de carbonetos de cromo podendo ser do tipo M₂₃C₆ ou M₇C₃ e, da matriz ferrosa austenítica ou ferrítica (LEITE, VILLANI, 2009; PACHECO, 2018). Quanto ao crescimento destas fases destaca-se que ela se inicia de uma região de crescimento epitaxial planar, seguido por um crescimento celular que rapidamente desenvolve para um o crescimento dendrítico colunar, este sempre partindo do substrato para a superfície.

Já na Figura 14 apresenta-se os mapas de EDS da região central do revestimento da amostra Liga A, nela verifica-se que não há crescimento dendrítico colunar. Esta alteração morfológica é esperada uma vez que à medida que se afasta da linha de fusão o gradiente

térmico tende a diminuir e conseqüentemente há uma redução do superresfriamento constitucional. Nestas posições os grãos começaram a apresentar morfologia mais grosseira. Tal fato também é denotado na região da superfície do revestimento, conforme apresentado na Figura 15.

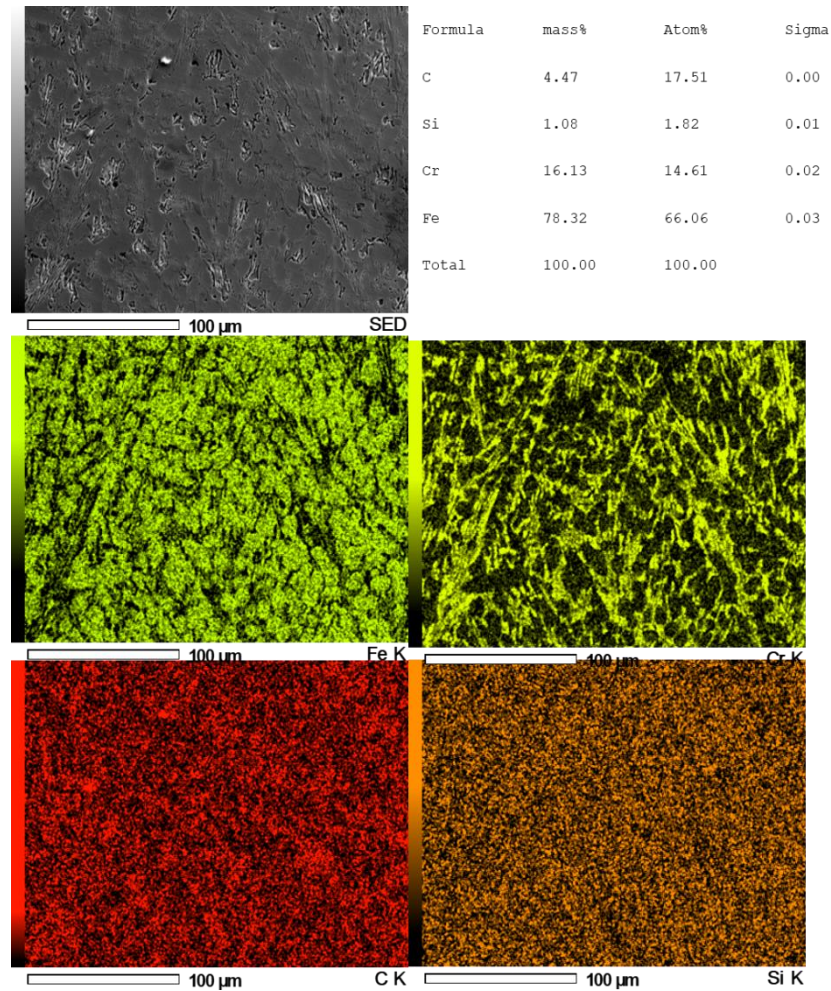


Figura 14 - MAPA elemental feito por EDS da região central do metal de adição _ amostra Liga A.

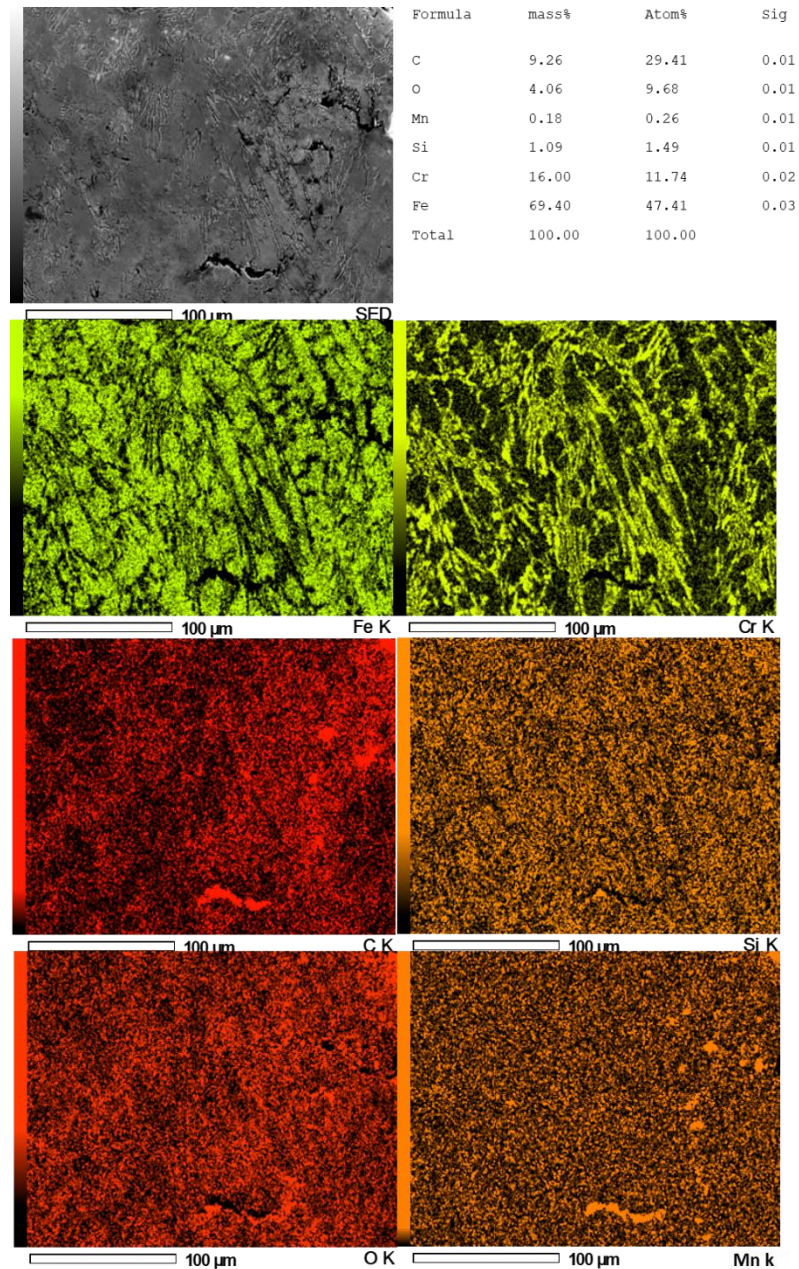


Figura 15 - MAPA elemental feito por EDS da região central do metal de adição _ Liga A.

A Figura 16 apresenta as metalografias da amostra da liga B com duas camadas. Em que: (a) apresenta a superfície do revestimento (MA); (b) a região central; (C) a interface entre revestimento e metal de base e; (d) é o metal de base (MB). Nas imagens é possível verificar o crescimento dendrítico partindo da interface de contato para parte superior do revestimento.

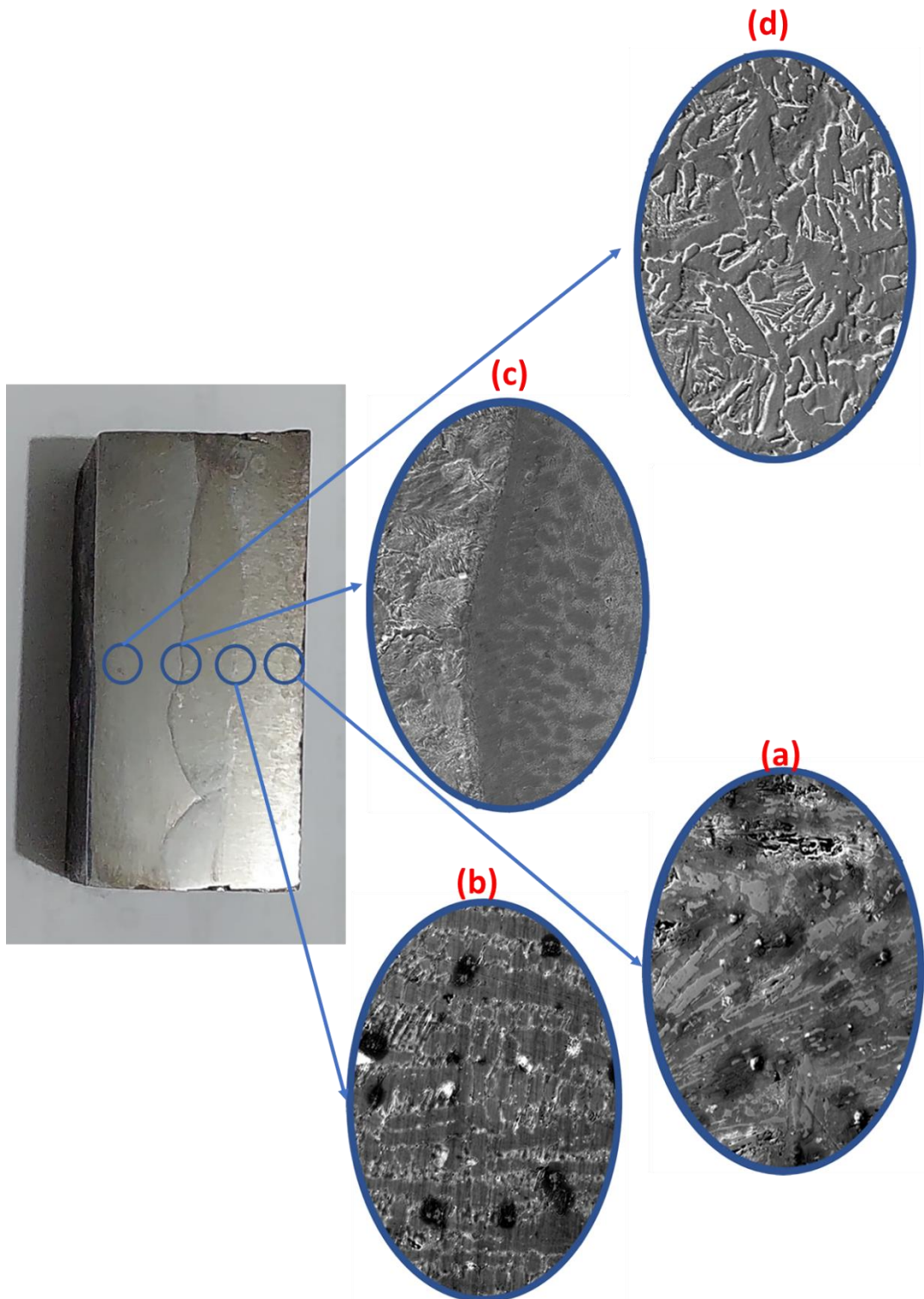


Figura 16 – Metalografia feita por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra Liga B com 2 camadas _ Magnificação 500x – elétrons. secundários.

Já na Figura 17 é apresentado a micrografia da região mais próxima da superfície do passe de solda. Na imagem é observável que a microestrutura é também formada por carbonetos poligonais e prismático de ferro e cromo (áreas escuras), constituinte eutético

formado por carbonetos de Fe-Cr, austenita e martensita (áreas claras). Além é verificado a existência de carbonetos de nióbio, pontos brancos brilhantes na imagem.



Figura 17 – Micrografia da região próxima a superfície, magnificação de 1000x, região (a).

A Figura 18 apresenta o mapa de EDS da interface do revestimento. No mapa é possível verificar concentrações de nióbio no revestimento, pontos brancos, tal fato corrobora com a tabela da composição química deste material. Ainda acerca do nióbio, verifica-se que este nesta região encontra-se bastante disperso.

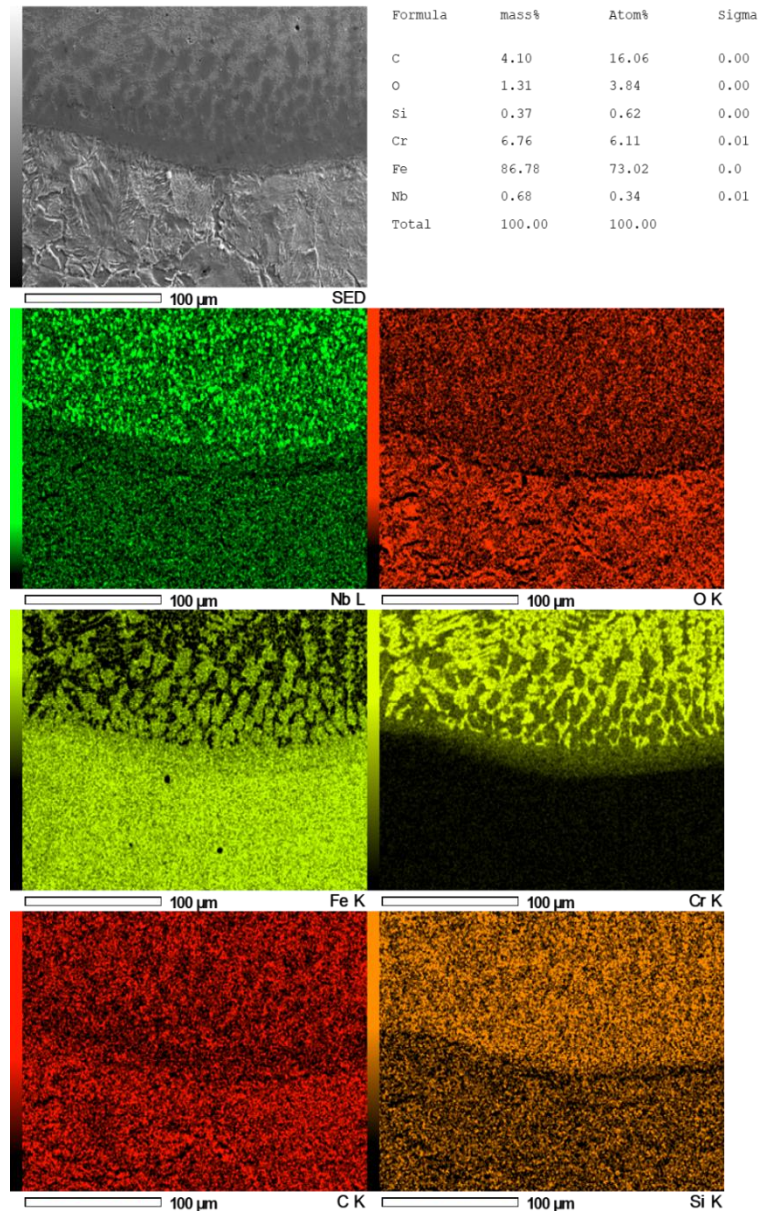


Figura 18 - MAPA elemental feito por EDS da região de interface entre o metal de adição e o substrato- liga B, 1 passe.

A Figura 19 e apresenta o mapa de EDS da amostra liga B na região CMA do revestimento. Nela é possível identificar o crescimento dendrítico colunar dos grãos de carbonetos de cromo da interface para a superfície do revestimento, sentido de maior gradiente térmico. Também se destaca o pequeno diâmetro dos carbonetos de nióbio(verde) e a forma homogêneo em que eles estão dispersos na matriz.

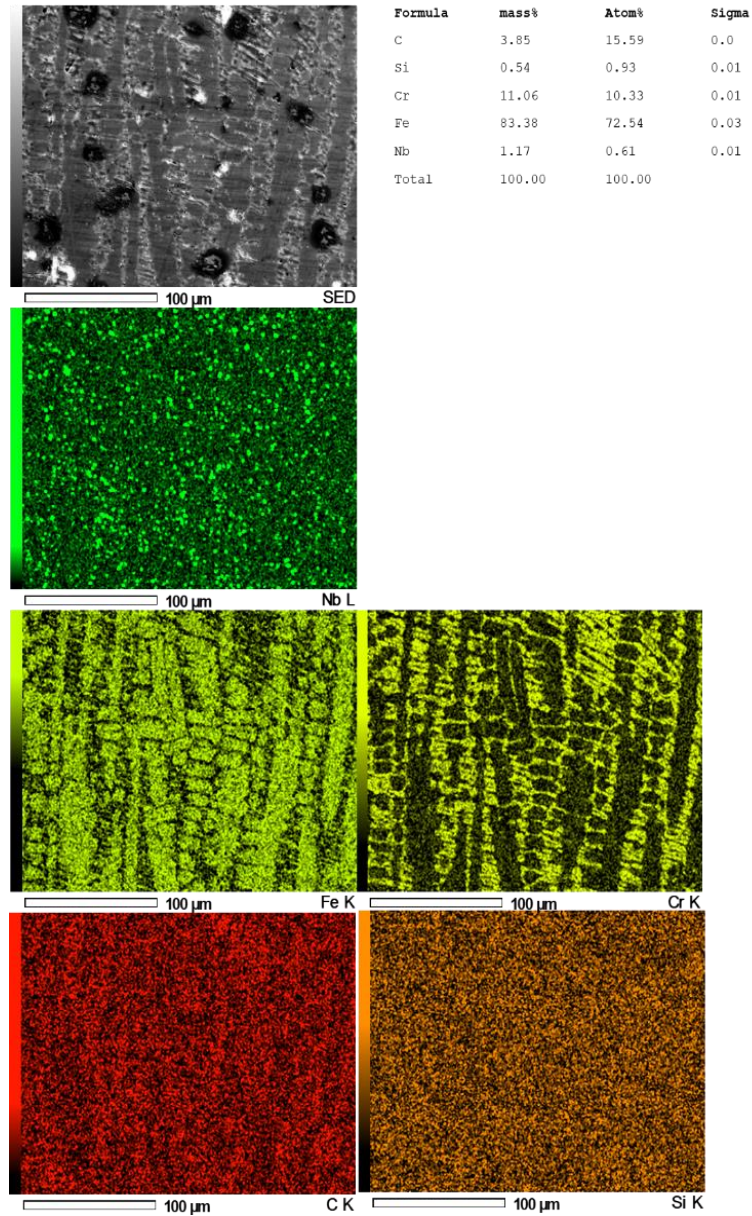


Figura 19 - MAPA elemental feito por EDS da região central do metal de adição, Liga B.

A Figura 20 apresenta o mapa de EDS da região adjacente à superfície do revestimento. Leva-se atenção ao maior tamanho dos carbonetos de nióbio, que apesar de não estarem aglomerados estes são visualmente maiores em comparação aos da Figura 19.

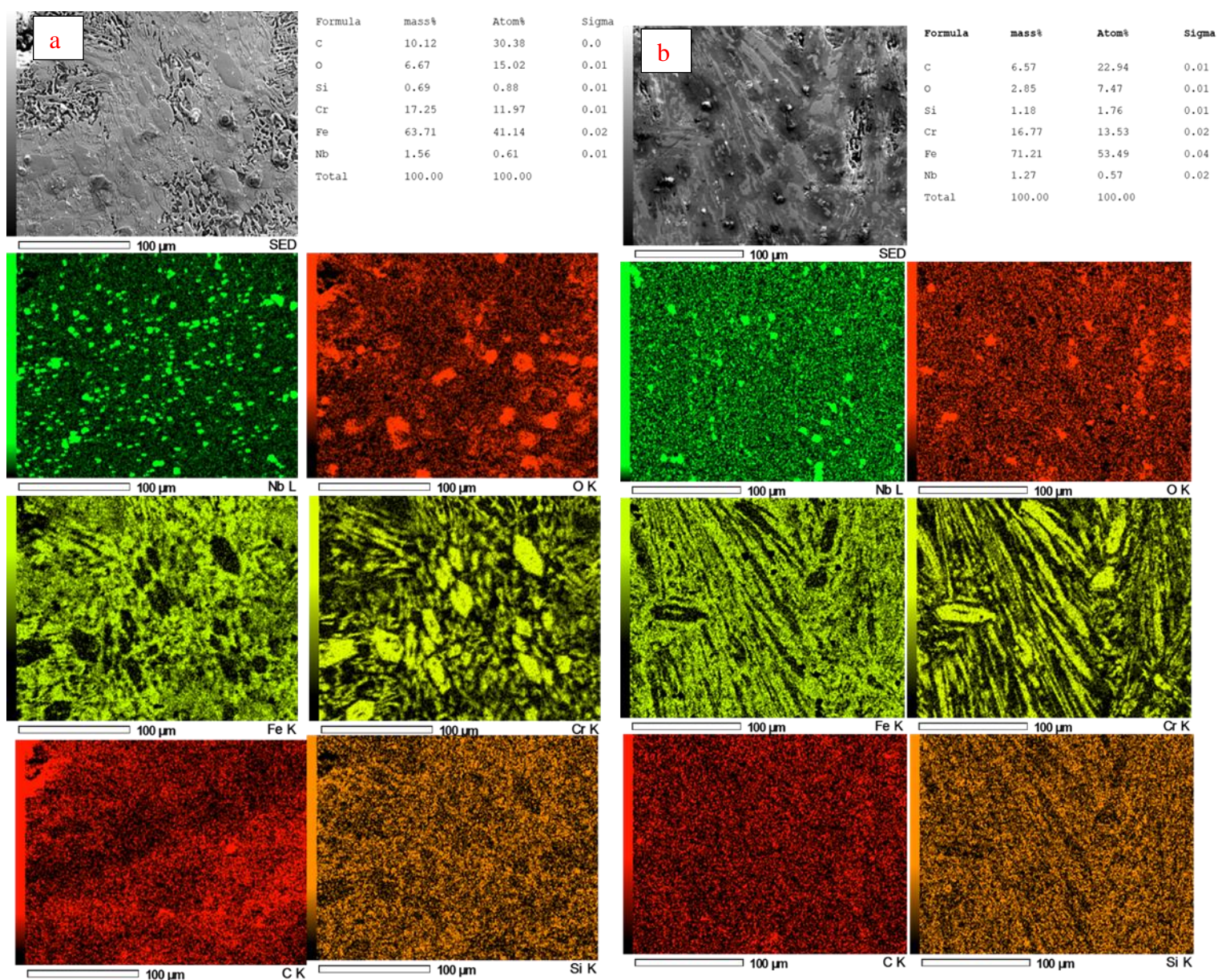


Figura 20 - MAPA elemental feito por EDS da região da superfície do metal de adição _ Liga B, 1 passe (a); Liga B, 2 passes (b).

Nas imagens também é possível constatar a existência de carbonetos poligonais e prismáticos de cromo no sentido de crescimento, do substrato para a superfície.

Sobre os resultados das tabelas de composição química calculados pelo EDS, é possível apreciar que os valores estão diferentes da ficha técnica dos materiais estudados, isto deve-se ao fato do EDS ser uma técnica semi-quantitativa, ou seja, seus resultados não são capazes de informar com exatidão a composição da liga. Porém, com ele é possível extrair informações comparativas entre a quantidade de elementos por região analisada. Tendo isto em vista, destaca-se que o cromo na região central sua concentração é menor que na região próximas a superfície.

Sobre esta observação é possível inferir que possivelmente o menor percentual de cromo entre as regiões deve-se a diluição do metal de solda no substrato. Uma vez na primeira camada de solda há a diluição do substrato nele e o mesmo não ocorre no segundo. Além, percebe-se que o tamanho dos carbonetos de nióbio no revestimento não é igualitário, tal fato potencialmente pode influenciar nas propriedades de dureza e resistência a abrasão da liga.

5.2. Análise de microdureza

A fim de se avaliar a variação da dureza da seção transversal dos cordões de solda foi realizado testes de microdureza em função da profundidade. A Figura 21 e Figura 22 apresentam estes resultados frente a macrografias das amostras. Em vermelho é indicado a segunda camada (C2), em laranja a primeira camada (C1) e em azul o metal base (MB).

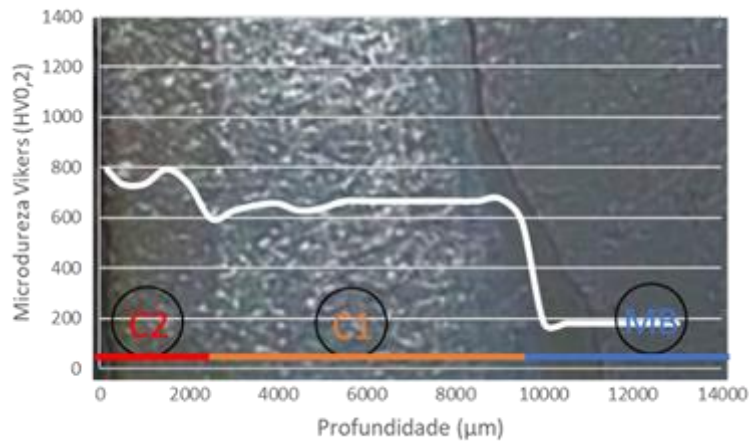


Figura 21 - Variação da microdureza média em relação a profundidade na seção transversal da liga A.

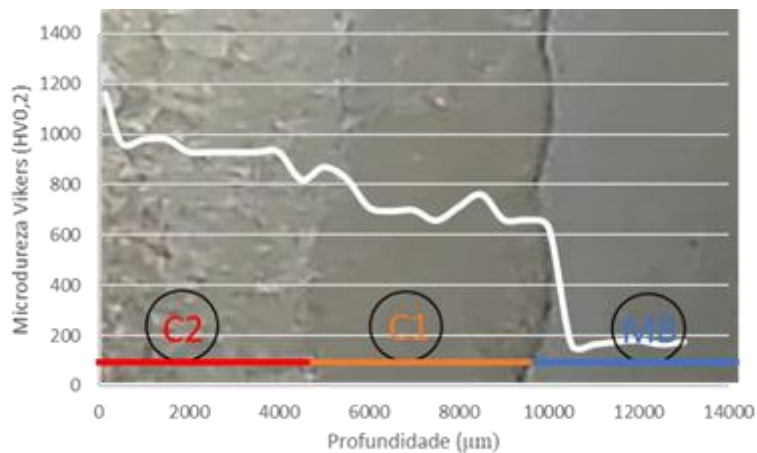


Figura 22 - Variação da microdureza média em relação a profundidade na seção transversal da liga B, 2 passes.

Conforme esperado, nos gráficos são evidenciados, em ambas as amostras, duas transições de dureza, a primeira ocorre entre a segunda camada de solda e a primeira camada, já a segunda transição de dureza ocorre entre a primeira camada para o metal de base. Os valores médios de dureza nas três regiões estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Nas figuras também é possível avaliar que a espessura da segunda camada da liga B (2000 μm) é menor que na liga A (5000 μm).

Na Figura 23 é apresentado o mapa de dureza em função da profundidade da amostra da liga B com uma camada de revestimento. Mais uma vez, foi visto uma abrupta transição de dureza entre o revestimento depositado e o metal de base. Destaca-se também que os valores de dureza do revestimento desta amostra foram maiores que o medido para a amostra liga A.

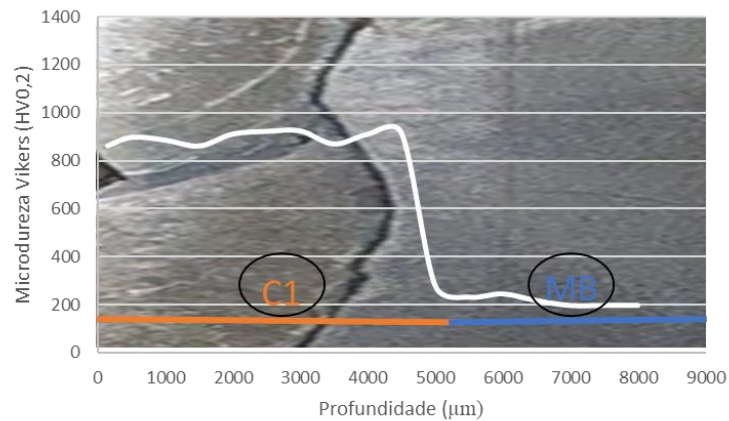


Figura 23 - Variação da microdureza média em relação a profundidade na seção transversal da liga B, 1 passe.

A Figura 24 apresenta a microdureza média de cada uma das camadas do revestimento e do metal de base.

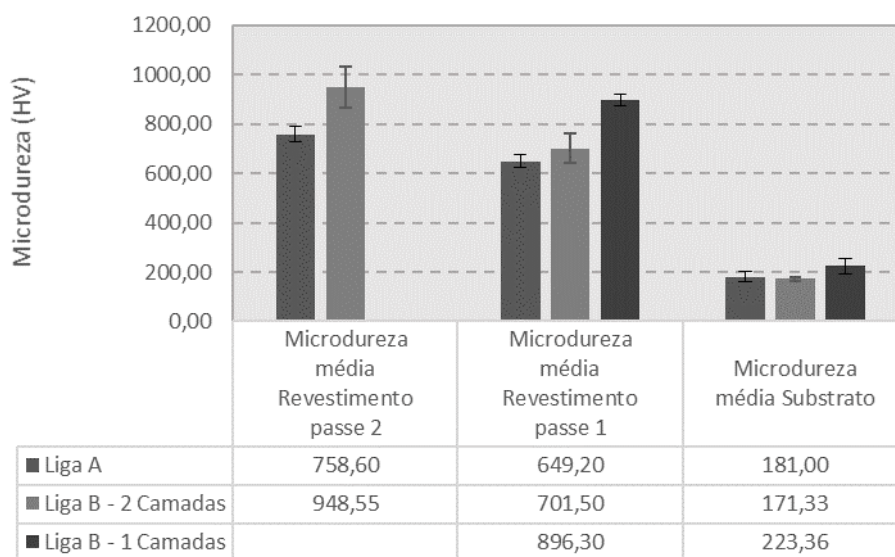


Figura 24 – Microdureza média - ligas A e liga B 1 e 2 camadas.

Ao avaliar a figura 24 percebe-se que as amostras obtidas pela deposição da liga B apresentaram maiores valores de dureza que as obtidas pela deposição da Liga A tanto para a amostra com uma camada quanto para a amostra com duas camadas de revestimento. Esse resultado está relacionado a presença do Nb como elementos formadores de carbonetos ou boretos complexos do tipo (MC;B) (CODOGNOTTO, 2018). Como esperado, a amostra com duas camadas de revestimento apresentou dureza maior que a amostra com apenas uma camada, evidenciando a redução do efeito da diluição das ligas com o material de base na segunda camada de revestimento. Também, a partir da análise dos dados, não pode se inferir variações de dureza em função da alteração da morfologia dos grãos. Isto, pois, não é visto grande alteração desta propriedade na região de grãos dentríticos colunares com os equiaxiais.

5.3. Desgaste

A Figura 25 apresenta como exemplo uma medida 3D feita da trilha de desgaste dos testes pino sobre plano realizados.

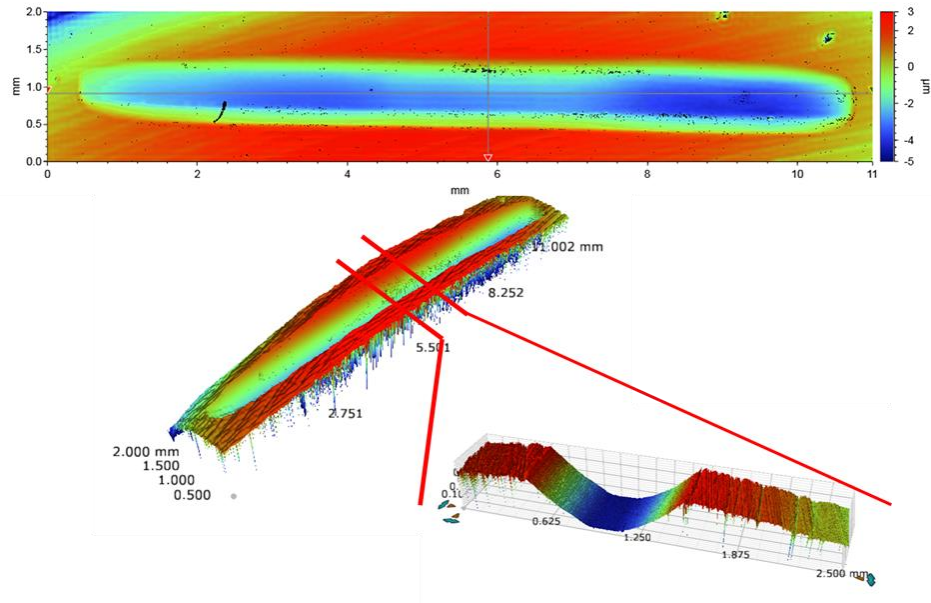


Figura 25 - Perfilometria Óptica 3D da trilha de desgaste gerada durante o teste.

Os resultados de desempenho ao desgaste são vistos na Figura 26, nela é apresentado os resultados de taxa de desgaste das amostras de estudo. Os dados evidenciam que a resistência ao desgaste do metal base (MB), como esperado, é inferior ao metal de adição (MA) para todas as ligas do estudo.

Ao avaliar o desempenho entre as diferentes ligas de metal de adição estudadas Liga A (sem nióbio) e B (com nióbio). Percebe-se que a liga com a presença de carbonetos de nióbio teve um desempenho superior.

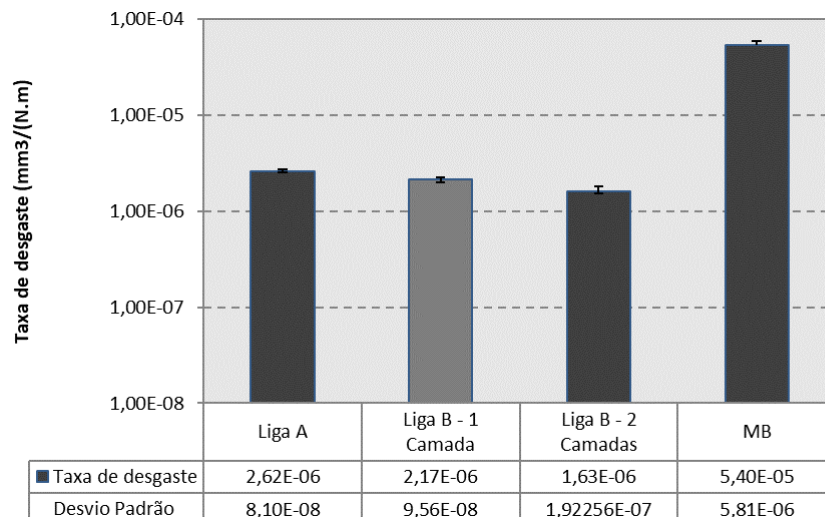


Figura 26 – Taxa de desgaste das amostras Liga A, Liga B 1 camada, Liga B 2 camadas e Metal de Base (MB).

O melhor desempenho da liga com nióbio pode ser entendido por dois fatores principais, o primeiro deve-se a maior dureza do material que, conforme descrito, a taxa de

desgaste é inversamente proporcional a dureza do material (lei de Achard) (HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017). Já o segundo ponto deve-se a grande quantidade de carbonetos finos de nióbio espalhados na matriz. Alguns autores destacam que tais carbonetos funcionam como barreiras metalúrgicas ao corpo abrasivo reduzindo o arrancamento de material (HUTCHINGS, SHIPWAY, 2017; PACHECO 2018; LEITE, VILLANI, 2009; MA ., 2013). Já Gregolin, discute em seu estudo que o carboneto de nióbio está intrinsecamente correlacionado a estruturas específicas que confere maior resistência ao desgaste, tais como a formação de carbonetos primários (GREGOLIN, 1999). Estes carbonetos de primários além de possuírem dureza superior aos carbonetos de cromo também funcionam como nucleadores de novos grãos. Esta presença de carbonetos mais finos e com maior dureza fazem uma estrutura maior resistência capaz de melhor proteger a matriz frente ao desgaste.

Já, ao avaliarmos o desempenho entre a liga B com uma e duas camadas percebe-se o melhor desempenho da liga com duas camadas. O fato de ter duas camadas permite uma menor diluição na camada mais externa, ou seja, uma menor diluição com o metal base. Muitos autores já apontaram os efeitos deletérios da diluição nos revestimentos duros, em geral, quanto maior a diluição maior a perdas de propriedades como dureza e resistência ao desgaste.

6. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos nos procedimentos experimentais e na análise destes, pôde-se concluir que:

- O desempenho ao desgaste teve correlação direta a dureza dos materiais de estudo. Ou seja, as amostras com maior dureza média obtiveram a menor taxa de desgaste.
- As amostras da liga B com um ou duas camadas obtiveram o melhor resultado de desgaste em comparação a amostra de Liga A e ao substrato de aço ASTM A36;
- Conforme esperado os revestimentos de estudo obtiveram uma taxa de desgaste cerca de 10 vezes inferior a taxa mensurada no substrato;
- A amostra da Liga B com duas camadas obteve os maiores valores de microdureza Vickers média, seguida pela amostra liga B um passe e depois a amostra Liga A;
- O maior valor de dureza da liga B deve-se principalmente a menor diâmetro médio dos carbonetos de nióbio. Estes além de serem menores que os carbonetos de cromo possuem maior dureza;
- As amostras apresentaram crescimento dentrídítico na região próxima ao substrato;
- Tanto a dureza quanto o desempenho ao desgaste da liga B com duas camadas obteve melhor resultado, tal fato era esperado e é atribuído principalmente a menor diluição da última camada de revestimento.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM International G40-15: Standard terminology relating to wear and erosion. West Conshohocken, 2015. 9p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM International G133-05: Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear¹, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM International G190-15: Standard Guide for Developing and Selecting Wear Tests¹, 2015.
- CODOGNOTTO CUNHA, MATEUS. ANÁLISE COMPARATIVA DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO UTILIZANDO UM ABRASÔMETRO DE TAMBOR DE REVESTIMENTOS DUROS DEPOSITADOS POR SOLDAGEM E DE AÇOS HARDOX®. 2018. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2018.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 50-190: 1979 _ *Hardness Depth of Heat Treated Parts – Part 2: Germany, 1979*
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 50320: Análise sistemática dos processos de desgaste. Classificação dos fenômenos de desgaste. 1997. v.53, p.619-622.
- EYRE, T. Wear characteristics of metals. *Tribology International*, v.9, n.5, p.203-212, 1976.
- GATES, J.D. Two-body and three-body abrasion: a critical discussion. *Wear*, v.214, p. 139-146, 1998.
- GREGOLIN, J. A. R. – Desenvolvimento de ligas Fe-C-Cr- (Nb) Resistentes ao Desgaste. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas (1990).
- HOLMBERG, Kenneth; KIVIKYTÖ-REPONEN, Päivi; HÄRKISAARI, Pirita; VALTONEN, Kati; ERDEMIR, Ali. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International* 115 (2017) 116-139.
- HUTCHINGS, I. M.; SHIPWAY, P. *Tribology: friction and wear of Engineering Materials*. 2.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 388p.
- JOST, H. P. Tribology – origin and future. *Wear*, v. 136, p. 1-17, 1990.
- KATO, K., ADACHI, K. Wear mechanisms. In: BHUSHAN, B. *Modern tribology handbook* 1. CRC Press LLC, 2001. v. I, Cap. 7, p. 273-300.
- LEITE, Ricardo Vinícius de Melo; MARQUES, Paulo Villani. Estudo comparativo da resistência ao desgaste abrasivo do revestimento de três ligas metálicas utilizadas na indústria, aplicadas por soldagem com arames tubulares. *Soldagem & Inspeção*, v. 14, p. 329-335, 2009.
- MA, Y. et al. Microstructure and properties of Ti–Nb–V–Mo-alloyed high chromium cast iron. *Bulletin of Materials Science*, v.36, n.5, p.839-844, Oct. 2013.

MELO LEITE, Ricardo Vinícius de; VILLANI MARQUES, Paulo. Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares. *Soldagem e Inspeção*, São Paulo, v. 14, n. 4, p. 329-335, 12 dez. 2009.

PACHECO, D. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E PROPRIEDADES MECÂNICAS E TRIBOLÓGICAS DE FERRO FUNDIDO BRANCO ALTO CROMO COM ADIÇÃO DE NIÓBIO. 2018. Dissertação (Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

PENAGOS, J. J. Efeito do refinamento da microestrutura e da adição de nióbio na resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos de alto cromo. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016. 120p. (Tese, Doutorado em Ciências).

PRADEEP, G. R. C.; RAMESH, A.; PRASAD, B. Durga. A review paper on hardfacing processes and materials. *International Journal of Engineering Science and Technology*, v. 2, n. 11, p. 6507-6510, 2010.

SINATORA, A. Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte. São Paulo: Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2 jun. 2005. (Erudição apresentada como parte dos requisitos do Concurso para provimento de cargo de Professor Titular)

STANDARD, I. S. O. 14577-1: 2015; Metallic materials—Instrumented indentation test for hardness and materials parameters—Part 1: Test method. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015.

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.225-229, p. 205-214, 1999.

VILLANI MARQUES, Paulo; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*. 4. ed. Belo Horizonte: Elsevier Editora Ltda., 2016. 361 p.

ZUM GAHR, K. H. Wear by hard particles. *Tribology International*. v.31, n.10, p.587- 596, 1998.