

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JORGE WILSON JOAY

**CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTO DEPOSITADO EM  
FRISOS DE RODAS DE VEÍCULOS FERROVIÁRIOS POR MEIO DO  
PROCESSO ARCO SUBMERSO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
(Tcc2 – Nº03)

CURITIBA  
2016

JORGE WILSON JOAY

**CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTO DEPOSITADO EM  
FRISOS DE RODAS DE VEÍCULOS FERROVIÁRIOS POR MEIO DO  
PROCESSO ARCO SUBMERSO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Ossimar Maranhão

CURITIBA

2016

## **TERMO DE ENCAMINHAMENTO**

Venho por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa “Caracterização de revestimento depositado em frisos de rodas de veículos ferroviários por meio do processo arco submerso”, realizada pelo aluno Jorge Wilson Joay, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ossimar Maranhão  
UTFPR - Damec

Curitiba, 2 de junho de 2016.

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “Caracterização de revestimento depositado em frisos de rodas de veículos ferroviários por meio do processo arco submerso”, realizada pelo aluno Jorge Wilson Joay, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Ossimar Maranhão  
DAMEC, UTFPR  
Orientador

Prof. Dr. Aldo Santos Pereira  
DAMEC, UTFPR  
Avaliador

Prof<sup>a</sup>. Dra. Ane Cheila Rovani  
DAMEC, UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 1º de julho de 2016.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho marca o final de uma grande jornada em minha vida. Porém, somente cheguei a este momento com a ajuda de várias pessoas.

Agradeço meu orientador prof. Dr. Ossimar Maranhão por seu apoio e direcionamento ao longo do desenvolvimento deste projeto.

Agradeço à prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ane Cheila Rovani pelas instruções e orientações sobre tribologia. E especialmente agradeço a ajuda no desenvolvimento e execução dos ensaios Reciprocating.

Agradeço ao prof. Dr. Aloísio José Schuitek por sua ajuda na preparação das amostras retificadas, etapa básica e crucial para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a meus pais por seu apoio, compreensão e incentivo ao longo de todos os anos de minha formação.

Agradeço aos amigos e colegas de curso que estiveram junto de mim em momentos de alegria e de necessidades acadêmicas. Sem vocês a graduação seria muito mais difícil.

Por fim, agradeço minha noiva Maira Ritter Cruz por sua compreensão nas longas horas despendidas em sua ausência, em razão da engenharia. Agradeço principalmente o seu apoio nos momentos mais difíceis e incertos desta grande empreitada que agora se encerra.

## RESUMO

JOAY, Jorge Wilson. **Caracterização de revestimento depositado em frisos de rodas de veículos ferroviários por meio do processo arco submerso**. 2016. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Neste trabalho foi realizada a caracterização do processo de recuperação de rodas de veículos ferroviários realizado por meio de deposição de revestimento nos frisos destas rodas pelo processo arco submerso. Inicialmente foi feito o acompanhamento presencial do processo em uma roda ferroviária e nesta oportunidade foram obtidos os parâmetros de operação e consumíveis utilizados. A seguir foram produzidas amostras da região recuperada. Estas amostras foram analisadas quanto à microestrutura morfológica por metalografia, ao perfil de dureza Vickers ao longo da solda, à composição química elementar determinada por EDS e ao desgaste por meio do ensaio Reciprocating variando-se a carga e a velocidade. Observou-se que o revestimento depositado difere do material base, sendo este um aço ao manganês com e aquele um aço cromo-manganês, sendo que a concentração de carbono no revestimento foi inferior à do metal base. Ambas as condições apresentaram uma estrutura perlítica em uma matriz ferrítica. A dureza obtida para o revestimento foi superior à do revestimento em cerca de 50 HV0,5, demonstrando que o endurecimento causado pela adição de cromo foi superior à redução da dureza devido à menor concentração de carbono. Observou-se que o a evolução do coeficiente de atrito ao longo dos tempos de ensaio foi muito semelhante tanto para o revestimento quanto para o metal base, sendo que as condições de menor velocidade apresentaram os maiores valores e as maiores variações em atrito. A perda volumétrica normalizada manteve-se constante com a variação da velocidade e decresceu com o aumento da carga normal aplicada tanto para o revestimento quanto para o metal base. Concluiu-se, então, que o revestimento depositado recupera o componente para características de desgaste similares às do material base.

**Palavras-chave:** Friso de roda. Ferroviário. Arco Submerso. Revestimento

## ABSTRACT

JOAY, Jorge Wilson. **Caracterização de revestimento depositado em frisos de rodas de veículos ferroviários por meio do processo arco submerso**. 2016. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This study was performed to characterize the railway vehicle flange wheel recovery process performed by coating the flange of these wheels by submerged arc process. Initially it was done in person monitoring the process on a railway wheel and on this occasion were obtained operating parameters and consumables used. Next, samples were obtained from the recovered region. These samples were analyzed for morphological microstructure by metallography, Vickers hardness profile along the welding, chemical composition elementary determined by EDS and wear test by reciprocating varying load and speed. It was observed that the deposited coating is different from the base material, this being a steel with manganese and that a chrome-manganese steel, and the carbon concentration in the coating was inferior to the base metal. Both tests had a pearlitic structure in a ferritic matrix. The hardness obtained for the coating was greater than the coating about 50 HV0,5, demonstrating that the stiffening caused by adding chromium was higher than the hardness reduction due to the lower concentration of carbon. It was observed that the evolution of the friction coefficient throughout the test time was very similar for both the coating and for the base metal, and the lowest velocity conditions showed higher values and larger variations in friction. The normalized volumetric loss remained constant with the variation of the speed and decreased with the increase of the normal load applied to both the coating and to the base metal. It is concluded then that the deposited coating component retrieves the wear characteristics similar to the base material.

**Keywords:** Wheel flange. Rail Road. Submerged Arc. Coating

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Máquina de Recuperação de Frisos Ferroviários.....	12
Figura 2 - Rodas Ferroviárias: Nova, desgasta e recuperada .....	13
Figura 3 - Bitola interna para ferrovia bitola 1000mm (métrica).....	13
Figura 4 - Perfil externo da roda ferroviária .....	14
Figura 5 - Contato roda - trilho em curvas .....	15
Figura 6 - Processo Arco Submerso .....	19
Figura 7 - Regiões do cordão de solda .....	20
Figura 8 – Adesão entre superfícies metálicas.....	22
Figura 9 – Oxidação em deslizamento a alta velocidade. ....	23
Figura 10 – Formação de camada óxida em baixas velocidades de deslizamento...	24
Figura 11 – Metodologia Adotada .....	25
Figura 12 – Composição química do arame de solda .....	26
Figura 13 - Composição química e aplicações recomendadas para o fluxo Esab 10.81 .....	27
Figura 14 - Composição química e aplicações recomendadas para o fluxo Esab 10.35H.....	27
Figura 16 – Etapas do Processo .....	28
Figura 16 – Pré-aquecimento da roda ferroviária .....	29
Figura 17 – Temperatura Superficial da Roda Ferroviária .....	29
Figura 18 - Região de corte oxi-acetilênico para obtenção de amostras.....	30
Figura 19 – Perfis de corte inicial e final das amostras .....	31
Figura 20 – Perfil de rugosidade das amostras após a retificação .....	31
Figura 21- Amostra após a retificação e corte com disco abrasivo .....	31
Figura 22 – Ilustração esquemática do equipamento de ensaio reciprocating .....	33



Figura 23 - Macroscopia da solda. ....	35
Figura 24 - Perfil de dureza Vickers HV0,5 da solda.....	36
Figura 25 - Micrografia metal base.....	36
Figura 26 - Metalografia do revestimento depositado .....	37
Figura 27 - Metalografia da ZTA.....	38
Figura 28 - Metalografia região de diluição. ....	39
Figura 29 - Evolução do coeficiente de atrito no metal base com carga igual a 8N ..	40
Figura 30 - Micrografia por varredura de elétrons da trilha de desgaste do metal base com força normal de 8N e velocidades de 50 e 100mm/s.....	41
Figura 31 – Perfil da trilha de desgaste do metal base com força normal de 8N e velocidade 50mm/s .....	42
Figura 32 – Perfil da trilha de desgaste do metal base com força normal de 8N e velocidade 100mm/s .....	42
Figura 33 - Evolução do coeficiente de atrito no revestimento com carga igual a 8N	43
Figura 34 - Micrografia por varredura de elétrons da trilha de desgaste do revestimento com força normal de 8N e velocidades de 50 e 100mm/s .....	44
Figura 35 – Perfil da trilha de desgaste do revestimento com força normal de 8N e velocidade 50mm/s .....	44
Figura 36 – Perfil da trilha de desgaste do revestimento com força normal de 8N e velocidade 100mm/s .....	45
Figura 37 - Evolução do coeficiente de atrito com carga normal de 8N e velocidade de 50mm/s no metal base e no revestimento.....	45
Figura 38 - Evolução do coeficiente de atrito com carga normal de 8N e velocidade de 100mm/s no metal base e no revestimento.....	46
Figura 39 - Evolução do coeficiente de atrito no metal base com carga igual a 30N	46
Figura 40 – Micrografia por varredura de elétrons da trilha de desgaste do revestimento com força normal de 30N e velocidades de 50 e 100mm/s .....	47

Figura 41 – Perfil da trilha de desgaste do revestimento com força normal de 30N e velocidade 50mm/s .....	48
Figura 42 – Perfil da trilha de desgaste do revestimento com força normal de 30N e velocidade 100mm/s .....	48
Figura 43 - Evolução do coeficiente de atrito com carga normal de 30N e velocidade de 50mm/s no metal base e no revestimento.....	49
Figura 44 - Evolução do coeficiente de atrito com carga normal de 30N e velocidade de 100mm/s no metal base e no revestimento.....	49
Figura 45 - Coeficiente de atrito médio para ensaios com velocidade de 50mm/s....	50
Figura 46 - Coeficiente de atrito médio para ensaios com velocidade de 70mm/s....	51
Figura 47 - Coeficiente de atrito médio para ensaios com velocidade de 100mm/s..	51
Figura 48 - Coeficiente de atrito médio para ensaios com força normal de 8N .....	52
Figura 49 - Coeficiente de atrito médio para ensaios com força normal de 15N .....	53
Figura 50 - Coeficiente de atrito médio para ensaios com força normal de 30N .....	53
Figura 51 – Perda volumétrica normalizada para velocidade de 50mm/s .....	54
Figura 52 – Perda volumétrica normalizada para velocidade de 70mm/s .....	55
Figura 53 – Perda volumétrica normalizada para velocidade de 100mm/s .....	55
Figura 54 – Perda volumétrica normalizada para carga normal de 8N .....	56
Figura 55 – Perda volumétrica normalizada para carga normal de 15N .....	56
Figura 56 – Perda volumétrica normalizada para carga normal de 30N .....	56

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Composição química do metal base e revestimento

37

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS**

AAR – Association of American Railroads (Associação Americana de Ferrovias)

ASTM – American Society for Testing and Materials (Associação Americana de Testes e Materiais)

COF – Coefficient of Friction (Coeficiente de Atrito)

EDS – Espectroscopia de raios X por dispersão em energia

MB – Metal Base

MRFF – Máquina de Recuperação de Frisos Ferroviários

ZTA – Zona Termicamente Afetada

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 Contexto do Tema .....	15
1.2 Caracterização do Problema .....	16
1.3 Objetivos .....	17
1.3.1 Objetivo Geral .....	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
1.4 Justificativa .....	17
<b>2 Fundamentação Teórica.....</b>	<b>18</b>
2.1 Soldagem.....	18
2.2 Soldagem por Fusão .....	18
2.3 Soldagem a Arco Elétrico .....	18
2.4 Soldagem a arco submerso.....	19
2.5 Metalurgia da soldagem .....	20
2.6 Desgaste.....	21
2.6.1 Desgaste Adesivo .....	22
2.6.2 Desgaste Oxidativo .....	23
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
3.1 Descrição da Metodologia .....	26
3.1.1 Acompanhamento do Processo.....	26
3.1.2 Obtenção de Amostras de Frisos de Rodas Ferroviárias Recuperadas .....	30
3.1.3 Metalografia do Metal Base e do Revestimento .....	32
3.1.4 Inspeção Amostral de Trincas e Inclusões no Revestimento Depositado.....	32
3.1.5 Medição de Dureza Vickers do Metal Base e do Revestimento.....	32
3.1.6 Ensaio de Desgaste por Reciprocating do Metal Base e do Revestimento .....	33
3.1.7 Determinação da Composição Química do Metal Base, do Revestimento e das Trilhas de Desgaste por EDS.....	34
3.1.8 Determinação da Perda Volumétrica de Material por Interferometria .....	34
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>35</b>
4.1 Análise Metalográfica e Perfil de Dureza .....	35
4.2 Análise de Desgaste.....	40
4.2.1 Análise dos resultados dos ensaios.....	40
4.2.2 Comparação do coeficiente de atrito do metal base e do revestimento.....	50
4.2.3 Comparação da perda volumétrica normalizada no metal base e no revestimento.....	54
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desgaste lateral de rodas ferroviárias é o principal fator para a determinação do fim de sua vida útil. O Reperfilamento da roda é o processo mais comum em equipamentos pesados como locomotivas e vagões (NETO 2006). Em veículos ferroviários, porém, não há material suficiente na bandagem de rodas para a realização de tal processo. Assim, a recuperação do friso da roda ferroviária mostra-se uma alternativa viável.

O processo de soldagem a arco submerso teve seu uso difundido mundialmente ao longo da 2ª Guerra Mundial. No Brasil este processo é amplamente utilizado na fabricação e recuperação de equipamentos metálicos (WAINER, 1992).

O processo caracterizado neste trabalho é executado na Máquina de Recuperação de Frisos Ferroviários (MRFF) apresentada na Figura 1 - Máquina de Recuperação de Frisos Ferroviários.



**Figura 1 - Máquina de Recuperação de Frisos Ferroviários**  
Fonte: Autoria própria<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> As figuras, tabelas e quadros sem indicação de fonte foram compiladas pelo próprio autor

As rodas de veículos ferroviários sofrem desgaste acentuado na região dos frisos devido ao desgaste adesivo (JING; ISHIDA; NAMURA, 2010). É possível recuperar o friso de uma roda até três vezes antes de seu descarte (NETO 2006). O processo consiste em aplicar vários passes de solda por arco submerso na região desgastada seguida de posterior usinagem para recuperação do perfil da roda. A Figura 2 mostra as três situações em uma roda ferroviária, da esquerda para a direita: nova, desgastada e recuperada (antes da usinagem).

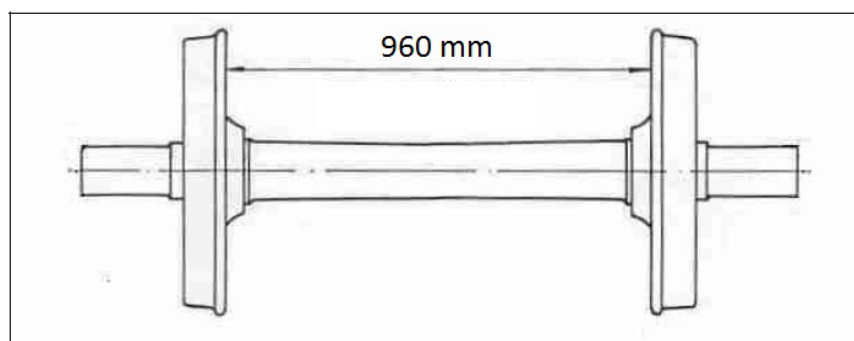


**Figura 2 - Rodas Ferroviárias: Nova, desgasta e recuperada**

Os veículos ferroviários cujos frisos de rodas serão estudados neste trabalho são do tipo Auto de linha, que possuem duas funções principais: o transporte dos colaboradores e equipamentos para o local de trabalho na via permanente e a inspeção visual prévia diária do trecho de ferrovia a ser liberado para o trânsito de trens.

As rodas ferroviárias são fabricadas em aço forjado ou fundido seguindo, no Brasil, as normas da Associação de Ferrovias Americana, AAR (SISDELLI, 2006).

A montagem das rodas no rodeiro é feita por pressão, respeitando-se a bitola da ferrovia. A Figura 3 mostra os limites internos da bitola para montagem do rodeiro.



**Figura 3 - Bitola interna para ferrovia bitola 1000mm (métrica)**

Fonte: Adaptado de Sisdeli, 2006

O perfil da bandagem da roda contempla uma inclinação que gera o efeito diferencial no eixo solidário, permitindo que o veículo realize as curvas (SISDELLI, 2006). A Figura 4 exemplifica um perfil de roda ferroviária.

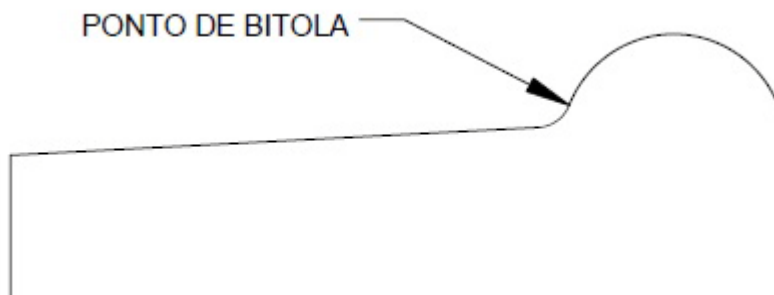


Figura 4 - Perfil externo da roda ferroviária

A região a ser recuperada na roda ferroviária pode ser observada na Figura 4 no item indicado ponto de bitola.

Neto (2006) afirma que o desgaste dos frisos das rodas ferroviárias ocorre acentuadamente nas curvas. Durante esta situação, o veículo ferroviário desloca-se lateralmente no gabarito da via até o limite imposto pela geometria da roda, fazendo contato entre as superfícies concordantes do boleto do trilho e do friso da roda. Na Figura 5 pode-se observar uma esquematização do contato entre roda e trilho em uma curva nas situações de trilho não desgastado (linha contínua) e trilho desgastado (linha pontilhada).





**Figura 5 - Contato roda - trilho em curvas**  
**Fonte: Adaptado de Cantera, 1993**

O contato metal-metal ocorre com deslizamento entre planos e geralmente a seco (CANTERA, 1993). Os fatores típicos existentes no desgaste de frisos de roda são (TOURNAY, 1997):

- raios de curva pequenos;
- inscrição inadequada dos truques;
- rodeiros desalinhados;
- contato roda-trilho mal lubrificado;
- amplo desgaste lateral para roda e trilho;
- ampla variação na bitola da via em curvas e retas;
- trilho de material mais macio;
- encaixe entre roda e trilho com desgaste (curvas).

## 1.1 Contexto do Tema

O prolongamento da vida útil das rodas ferroviárias promovido pela recuperação de seus frisos gera economia e agilidade na manutenção dos equipamentos ferroviários. A substituição das rodas no rodeiro demanda mais recursos, tanto financeiros quanto humanos, para ser realizada do que a sua recuperação (NETO, 2006).

## **1.2 Caracterização do Problema**

O problema a ser solucionado neste trabalho é a falta de informações técnicas necessárias para avaliação, planejamento e execução da recuperação dos frisos de rodas ferroviárias por meio de deposição de revestimento por arco submerso.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Caracterizar o revestimento depositado por arco submerso no friso de rodas de veículos ferroviários.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Determinar a microestrutura metalográfica do metal base e do revestimento.
- Medir a dureza ao longo da solda.
- Determinar evolução temporal do coeficiente de atrito dinâmico do metal base e do revestimento variando-se a carga normal e a velocidade de deslizamento.
- Avaliar composição química do metal base, revestimento e trilhas de desgaste por Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS).
- Quantificar desgaste por perda volumétrica no metal base e no revestimento.
- Comparar o desgaste no metal base e no revestimento.

## **1.4 Justificativa**

O processo de deposição de revestimento em rodas de veículos ferroviários opera em uma condição obtida empiricamente. Assim, surge a oportunidade de o autor utilizar o conhecimento adquirido ao longo do curso para caracterizar o processo.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Soldagem**

A sociedade americana de soldagem define soldagem como o processo de união de materiais estabelecendo ligações químicas, na região de união, similares às do metal base.

Relatos históricos evidenciam formas primitivas de união de metais na antiguidade, porém considera-se que a soldagem moderna teve origem no início do século XIX com a descoberta do arco elétrico por Sir. Humpfhrey Davis (SILVA, 1997 apud ARAUJO, 2006, p.27)

### **2.2 Soldagem por Fusão**

Define-se soldagem por fusão como o processo no qual a coalescência entre os materiais a serem unidos é obtido pela fusão de ambos os materiais. A soldagem por fusão pode utilizar ou não metal de adição, a depender da aplicação pretendida.

A energia necessária para a fusão dos materiais pode ser originária de processos termoquímicos, efeito Joule ou arco elétrico (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1978).

### **2.3 Soldagem a Arco Elétrico**

Soldagem a arco elétrico é um processo cuja fonte de energia é a formação de um arco elétrico entre a peça e o eletrodo, podendo este ser consumível ou não. O arco elétrico forma-se quando o gás ionizado pela diferença de potencial entre o eletrodo e a peça conduz corrente elétrica. O calor gerado pela movimentação dos elétrons possui densidade energética suficiente para aquecer e fundir o metal. Com

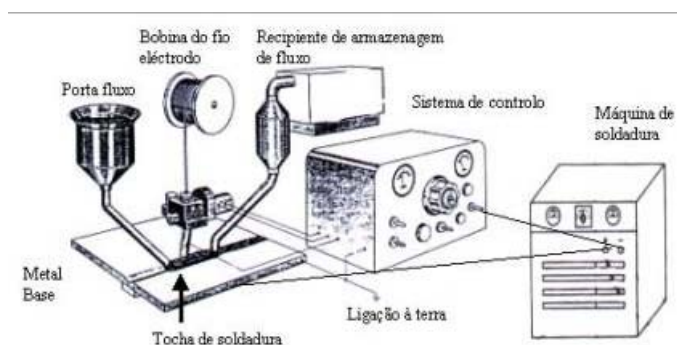
o aumento da temperatura ocorre uma maior emissão de elétrons, que resulta em uma maior ionização térmica da atmosfera que envolve o arco elétrico. (WAINER 1992).

A energia elétrica utilizada deve ser modificada por fontes de soldagem antes de ser utilizada. Tipicamente utiliza-se baixa tensão (na ordem de 20 a 80 volts) e alta corrente (geralmente 50 até 1500 amperes). As fontes de soldagem podem ser classificadas em corrente constante ou tensão constante, sendo esta mais comumente utilizada em processos automatizados. (AMERICAN WELDING SOCIETY).

## 2.4 Soldagem a arco submerso

O processo de soldagem a arco submerso diferencia-se dos demais processos a arco elétrico pelo uso de fluxo granulado para a proteção do arco e da poça de fusão. O fluxo sólido é composto de grânulos que se fundem parcialmente, criando uma atmosfera protetora e uma camada de escória que protege a região de solda até o seu resfriamento (PARANHOS; SOUZA, 1992).

O fluxo fundido isola completamente o arco elétrico da atmosfera, gerando uma solda sem respingos e faíscas. Devido ao fato de o fluxo ser isolante térmico, aumenta-se a concentração de calor na junta soldada e conseqüentemente a penetração obtida no processo (MARQUES, 1991). Observa-se o processo esquematizado na Figura 6.



**Figura 6 - Processo Arco Submerso**  
Fonte: Marques, 1991

## 2.5 Metalurgia da soldagem

O comportamento da microestrutura da solda durante e após o processo de soldagem são objetos de estudo da metalurgia da soldagem. A solda pode ser dividida em zona fundida (ZF), zona de ligação (ZL), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB), conforme se observa na Figura 7 (WAINER, 1992).

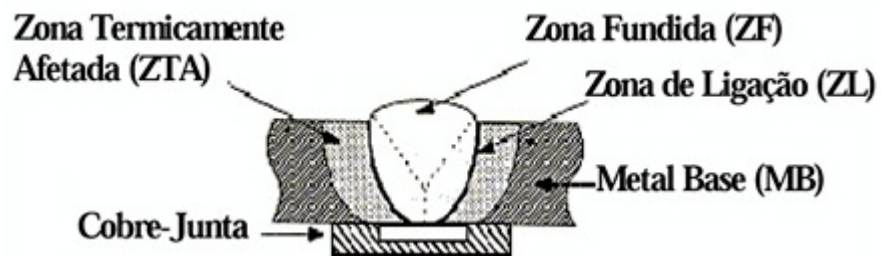


Figura 7 - Regiões do cordão de solda  
Fonte: Marques, 1992

A zona fundida é a região na qual o ponto de fusão do metal base é ultrapassado, gerando a poça de fusão. É nesta região que o metal de adição é depositado e podem ocorrer alterações na composição do metal de solda. A velocidade de resfriamento da zona fundida é fator determinante para a determinação da morfologia e modos de crescimento de grão.

A zona de ligação é a interface entre a zona fundida e a zona termicamente afetada, trata-se do limite da poça de fusão.

A zona termicamente afetada é a região que sofre transformações metalúrgicas sem a ocorrência de fusão. A ZTA pode ser subdividida de acordo com a variação da curva de resfriamento.

## 2.6 Desgaste

Segundo Hutchings (1992), o deslizamento de uma superfície sobre outra resulta em forças de atrito que tendem a remover partículas destas superfícies, alterando suas características superficiais como rugosidade e dureza. O desgaste por deslizamento comumente é descrito como desgaste adesivo, mas a adesão entre as superfícies é apenas um dos mecanismos físicos e químicos existentes neste fenômeno.

Hutchings (1992) afirma que a taxa de remoção de material depende de fatores como a rugosidade das superfícies, velocidade de deslizamento, força normal de contato, temperatura, ambiente, duração do contato e as propriedades do material. Observa-se a não linearidade em ensaios de desgaste devido à mudança abrupta de modo de desgaste ao longo do ensaio. Devido ao grande número de variáveis envolvidas, existe uma incerteza na comparação entre testes de laboratório e o desgaste efetivo encontrado em operação prática.

Segundo a teoria de Holm e Archard, o deslizamento entre duas superfícies deformará plasticamente os picos da superfície, alterando a área de contato efetiva. Na equação 1, conhecida como equação de Archard, observa-se que taxa de desgaste  $Q$  é relacionada diretamente com a carga  $W$  e inversamente com a dureza de indentação  $H$  através do coeficiente de desgaste  $K$ . (HUTCHINGS, 1992)

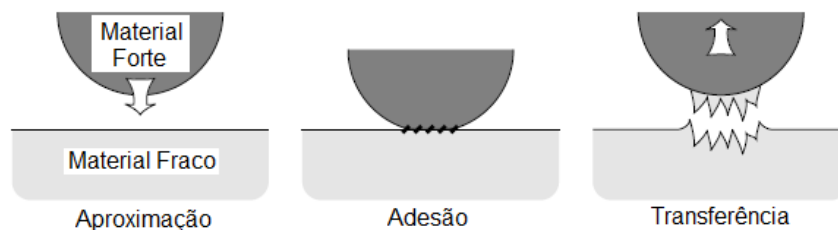
$$Q = \frac{KW}{H} \quad (1)$$

A equação de Archard é válida apenas quando o sistema tribológico analisado encontra-se dentro do mesmo regime de desgaste. A variação nas tensões, temperatura e o surgimento de oxidação alteram o mecanismo de desgaste e este pode ser avaliado pela evolução do coeficiente de desgaste (HUTCHINGS, 1992).

### 2.6.1 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo ocorre quando há contato direto entre duas superfícies com movimento relativo entre si e a distância entre as superfícies é tal que permita o fenômeno da adesão. As forças de ligação geradas na adesão usualmente superam o limite de resistência dos materiais em contato, ocasionando transferência de material (BLAU, 2009).

As forças atrativas entre as superfícies em movimento são muito maiores do que no quando o contato ocorre estaticamente em condições ambiente, pois, à exceção dos metais nobres, todos os metais expostos ao ar atmosférico apresentam uma camada nanométrica de óxidos sobre suas superfícies, evitando o contato real entre os corpos. A adesão entre metais pode ser explicada pela ligação metálica advinda da transferência de elétrons entre as superfícies quando estas estão separadas por uma distância próxima à ordem de grandeza do raio atômico, tipicamente menor do que 1 (um) nanômetro. A Figura 8 mostra o fenômeno da transferência metálica por adesão, no qual o metal com menor dureza sofre remoção de massa quando ocorre a separação das superfícies, pois a força de adesão é superior ao limite de resistência do material. (BATCHERLOR; STACHOWIAK, 2006)



**Figura 8 – Adesão entre superfícies metálicas**  
**Fonte: Adaptado de Batcherlor; Stachowiak, 2006**

Batcherlor e Stachowiak (2006) afirmam, também, que o motivo para a diferença entre as forças adesivas estáticas e dinâmicas encontra-se no fato de que no contato dinâmico há uma força normal ao contato que elimina a camada oxidada e expõe o metal ao contato direto com seu par tribológico. Ocorre também a remoção dos picos de rugosidade da superfície, aumentando a área de contato efetiva.

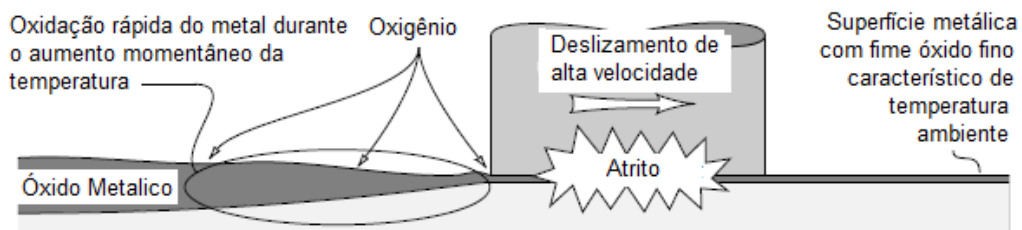
Devido às altas forças geradas no desgaste adesivo, este mecanismo de desgaste geralmente é classificado como desgaste severo, devido à alta taxa de



deformação plástica e remoção de material envolvida neste processo (BATCHERLOR; STACHOWIAK, 2006).

### 2.6.2 Desgaste Oxidativo

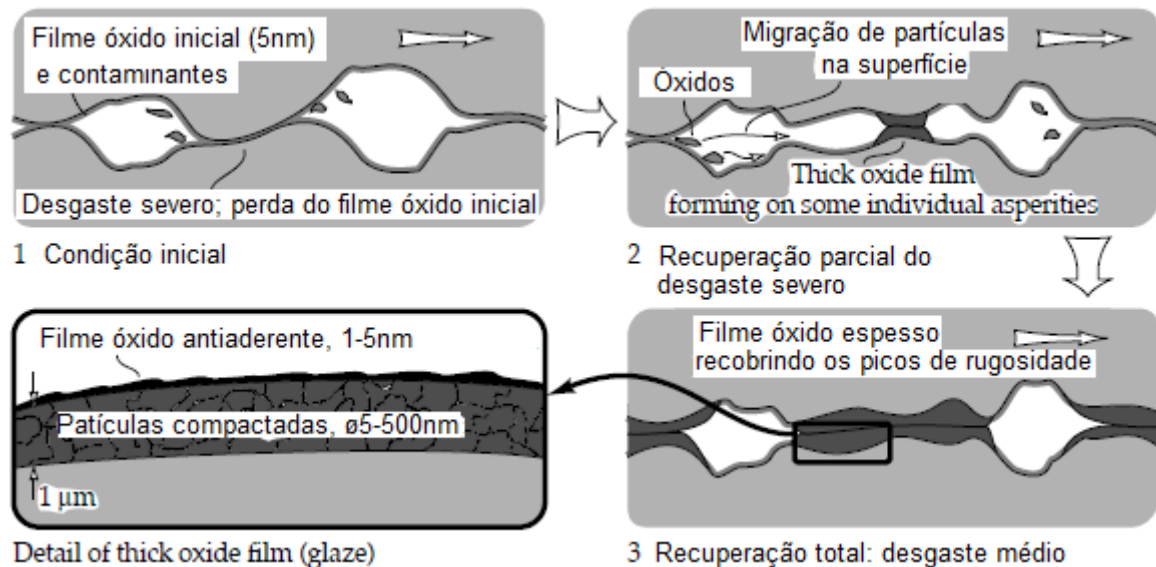
Segundo Batcherlor e Stachowiak (2006), desgaste oxidativo ocorre no contato não lubrificado de metais na presença de ar atmosférico. O processo governante na formação de óxidos metálicos é o aumento da temperatura superficial local por atrito de modo suficiente para que a superfície tenha energia suficiente para ativar e acelerar o processo de oxidação do metal. O crescimento da camada óxida para altas velocidades de deslizamento, acima de 1m/s, é ilustrado na Figura 9.



**Figura 9 – Oxidação em deslizamento a alta velocidade.**  
**Fonte: Adaptado de Batcherlor; Stachowiak, 2006**

O desgaste oxidativo também é observado em condições de deslizamento de baixa velocidade, abaixo de 1m/s, e temperatura ambiente. O mecanismo de desgaste difere daquele a altas velocidades de deslizamento, pois não há geração de temperatura superficial local suficiente para a oxidação de toda a superfície. No início do contato, a camada óxida pré-existente é removida e inicia-se um processo de desgaste adesivo severo que tende a gerar pontos de alta temperatura, preferencialmente nos picos de rugosidade do material. Estes possuem energia suficiente para que a oxidação rápida do metal ocorra. Porém, com o aumento da fragilidade aliado à baixa área de ancoramento destes óxidos à superfície, ocorre o arrancamento destas partículas. Os debris removidos permanecem entre as superfícies em contato e se aderem novamente à superfície, por meio da pressão de contato presente no deslizamento, juntamente com uma fração das partículas

metálicas removidas por desgaste adesivo. São formadas, assim, pequenas “ilhas de óxidos”. Estas tendem a aumentar em tamanho, formando pequenas regiões de filme óxido analogamente ao resultado obtido no deslizamento em altas velocidades (BATCHERLOR; STACHOWIAK, 2006). Este processo está ilustrado na Figura 10.



**Figura 10 – Formação de camada óxida em baixas velocidades de deslizamento**  
**Fonte: Adaptado de Batcherlor; Stachowiak, 2006**

As principais características do desgaste oxidativo são: formação de uma camada de óxido sobre a superfície sob atrito, alteração na composição do material removido por desgaste de partículas de metal para óxidos metálicos, coeficiente de atrito estável e mecanismo de desgaste moderado e constante. Contudo, com a continuidade do aumento da temperatura superficial, a camada óxida tende a se tornar mais espessa e frágil. Após uma espessura crítica, ocorre a quebra da camada óxida e exposição do metal desprotegido ao desgaste. Sem a presença da camada protetora óxida, há uma tendência da predominância do desgaste adesivo em modo severo, fato este que pode ser observado pelo aumento e pela instabilidade do coeficiente de atrito. (BATCHERLOR; STACHOWIAK, 2006)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada seguiu as etapas mostradas na Figura 11.

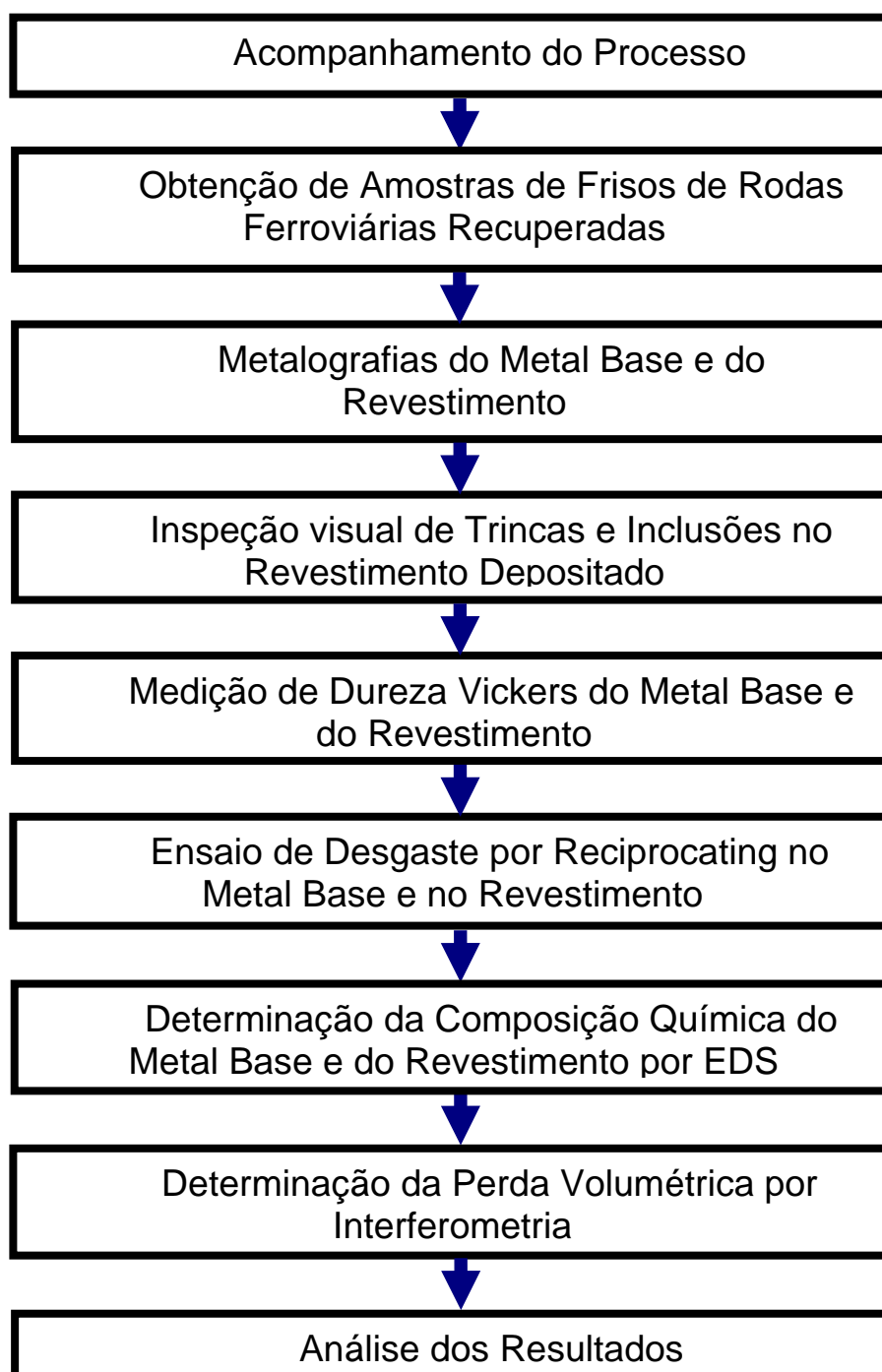


Figura 11 – Metodologia Adotada

### 3.1 Descrição da Metodologia

#### 3.1.1 Acompanhamento do Processo

Acompanhou-se a execução da recuperação de friso de roda ferroviária a fim de se obter os parâmetros utilizados no processo em seu estado atual. Verificou-se pelas indicações da máquina modelo Shield Arc Welder da marca Lincoln Electric CO. que a tensão utilizada é de aproximadamente 32V. A polaridade utilizada é reversa, com pólo negativo aplicado sobre a peça. A velocidade de alimentação do arame de solda é de aproximadamente 0,5m/min. A partir da velocidade angular fixa do rodeiro e o diâmetro no ponto de bitola, foi possível obter a velocidade linear do cordão de solda como sendo igual a 0,5m/min.

##### 3.1.1.1 Consumíveis

Utilizou-se o arame sólido de aço da marca Gerdau, classe AWS A 5.17, tipo EL12 cuja composição química nominal pode ser vista na Figura 12

CLASSE	TIPO	ELEMENTOS	C	Si	Mn	S	P	Cu
AWS A 5.17	EM-12K	% MÍN.	0,05	0,1	0,8	–	–	–
		% MÁX.	0,15	0,35	1,25	0,03	0,03	0,035*
	EL-12	% MÍN.	0,04	–	0,25	–	–	–
		% MÁX.	0,14	0,1	0,6	0,03	0,03	0,035*
	EM-13K	% MÍN.	0,06	0,35	0,9	–	–	–
		% MÁX.	0,16	0,75	1,4	0,03	0,03	0,035*

Figura 12 – Composição química do arame de solda  
Fonte: Gerdau, 2013

Utilizou-se uma mistura de dois fluxos distintos da marca Esab (10.81 e 10.35H) à proporção de 50% cada. O fluxo Esab 10.81 é um fluxo aglomerado do tipo ativo com característica ácida. A Figura 13 mostra um excerto do catálogo do fabricante com a composição química e aplicações recomendadas.

### 5.9 - FLUXOS AGLOMERADOS - ATIVOS

OK® FLUX	APLICAÇÕES	ARAME	CLASSIFICAÇÃO	METAL DEPOSITADO (%)	PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS
Ativo <b>10.81</b>	Fluxo aglomerado ativo, ácido, de grande versatilidade. Aplicável em velocidade de soldagem elevada, em CC+ / CA. Destaca-se por sua excelente remoção de escória e ótima aparência do cordão de solda. Aplicável em construções gerais, tubulações, perfis e rodas. Em soldas multipasses é possível o aumento dos teores de Si e Mn do metal de solda; recomenda-se uma espessura máxima da chapa a ser soldada de 25 mm.	<b>OK® Autrod 12.10</b> ASME SFA-5.17 EL12	ASME SFA-5.17 F7AZ-EL12 (F48AZ-EL12)	C 0,07 Si 1,00 Mn 1,50 Cu 0,10	L.R. 575 MPa L.E. 490 MPa A 28%
		<b>OK® Autrod 12.22</b> ASME SFA-5.17 EM12K	ASME SFA-5.17 F7A0-EM12K (F48A2-EM12K)	C 0,08 Si 1,08 Mn 1,65 Cu 0,10	L.R. 635 MPa L.E. 560 MPa A 27% Ch V (-18 °C) 32J

Figura 13 - Composição química e aplicações recomendadas para o fluxo Esab 10.81  
Fonte: ESAB, 2013

Já o fluxo Esab 10.35H é um fluxo aglomerado para revestimento duro e recomendado pelo fabricante para aplicações com presença de desgaste abrasivo. A composição química e aplicações recomendadas podem ser vistas no excerto do catálogo do fabricante na Figura 14

### 5.6 - FLUXOS AGLOMERADOS PARA REVESTIMENTO DURO

OK® FLUX	APLICAÇÕES	ARAME	CLASSIFICAÇÃO	METAL DEPOSITADO (%)	PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS
Ligado <b>10.35H</b> Revestimento duro	Fluxo aglomerado ligado ao cromo, utilizado em CC+ para revestimentos duros e placagem resistentes ao desgaste abrasivo. Possui excelente capacidade de remoção de escória, mesmo sobre metal ao rubro, o que facilita a operação de revestimento de peças rodantes, links, rolos e rodas guia. O depósito é usinável.	<b>OK® Autrod 12.10</b> ASME SFA-5.17 EL12	DIN 8555 UP-1-GW-350	C 0,20 Si 0,50 Mn 1,50 Cr 1,30 Cu 0,10	<b>Dureza Típica</b> 35 HRC <b>Parâmetros:</b> Arama: 2,38 mm 350 A / 29 V 40 cm / min

Figura 14 - Composição química e aplicações recomendadas para o fluxo Esab 10.35H  
Fonte: ESAB, 2013

### 3.1.1.2 Descrição do Processo

As etapas do processo foram listadas na Figura 16

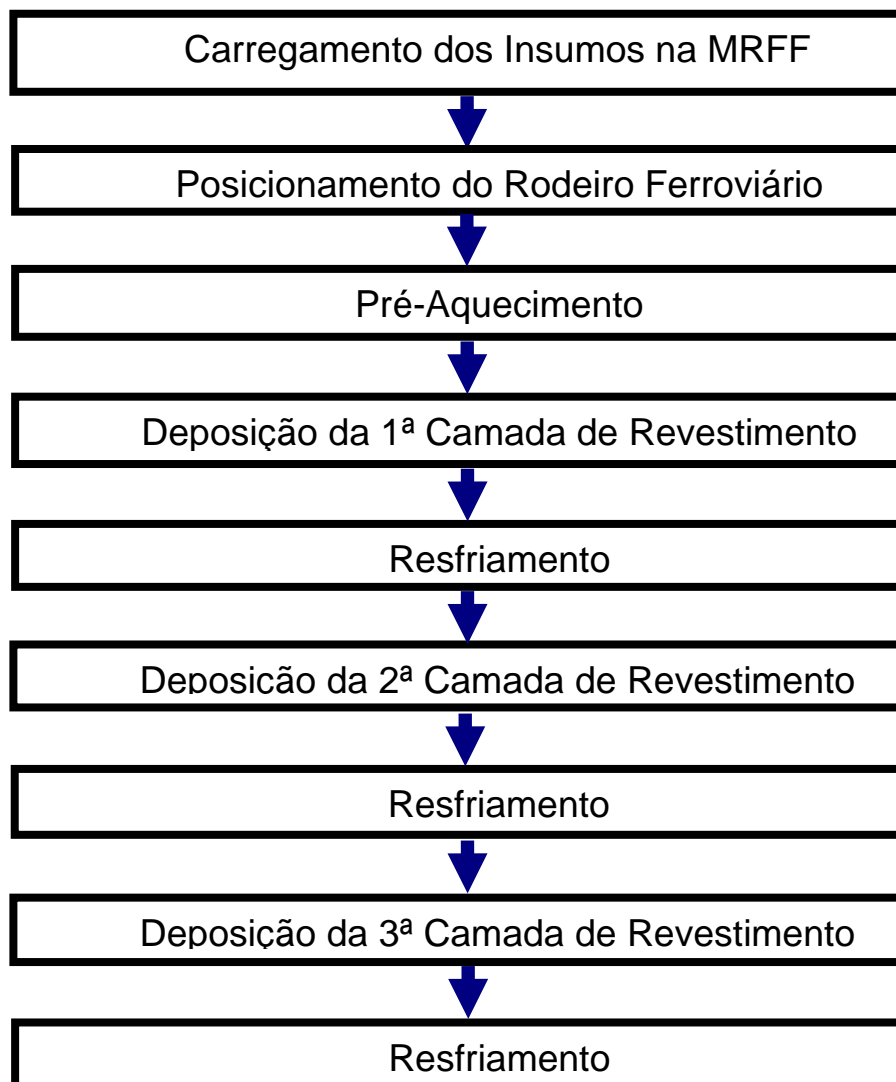


Figura 15 – Etapas do Processo

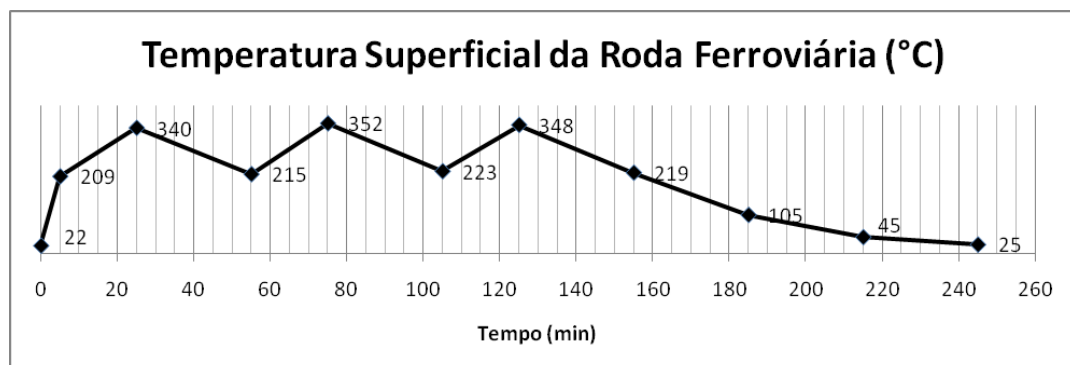
Inicialmente, carregam-se os insumos, mistura de fluxos e carretel de arame de solda, na MRFF. A seguir posiciona-se e fixa-se o rodeiro à MRFF com o auxílio de uma empilhadeira. Inicia-se o movimento angular do rodeiro e, então, a fase de pré-aquecimento. A temperatura superficial alvo de 200°C é atingida em cerca de 5 minutos com o uso de um bico de oxi-acetileno conforme se observa na Figura 16. Posiciona-se a tocha de solda no ponto de bitola e realiza-se o primeiro passe em

toda a circunferência da roda. A cada revolução completa da roda, a tocha de solda é movida radialmente de modo que o revestimento seja depositado em toda a superfície do friso desgastado. Após a deposição da camada sobre toda a superfície do friso, interrompe-se a rotação da máquina, enclausura-se a roda e aguarda-se o resfriamento lento da roda por 30 minutos para que a sua temperatura superficial se aproxime da temperatura do início da deposição do revestimento. Repetiu-se o procedimento de deposição de revestimento e resfriamento lento por mais duas vezes, totalizando três camadas depositadas.



**Figura 16 – Pré-aquecimento da roda ferroviária**

A curva de temperatura do processo foi obtida por meio de um termômetro infravermelho do tipo pistola e pode ser observada na Figura 17, que mostra a evolução da temperatura ao longo do tempo em minutos. A medição foi feita no início e fim de cada etapa do processo.



**Figura 17 – Temperatura Superficial da Roda Ferroviária**

### 3.1.2 Obtenção de Amostras de Frisos de Rodas Ferroviárias Recuperadas

Foram removidas 3 seções da roda mediante o uso de oxi-corte conforme disposição mostrada na Figura 18.



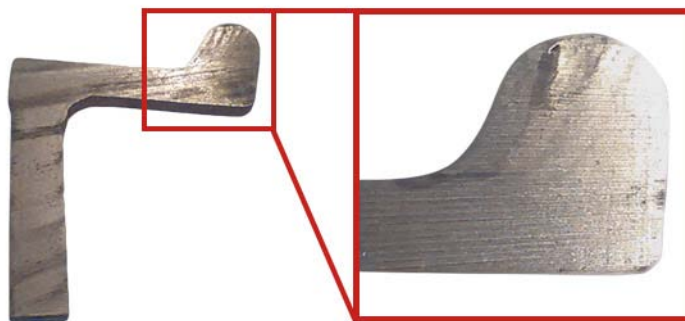
**Figura 18 - Região de corte oxi-acetilênico para obtenção de amostras**

A região destacada em vermelho na Figura 18 foi separada da roda por oxi-corte. A região hachurada, com cerca de 150mm de comprimento, foi removida por corte na serra-fita e descartada devido à influência da temperatura do processo precedente sobre a seção removida.

Posteriormente as seções da roda foram cortadas axialmente com auxílio de serra-fita cujas etapas de perfis são observadas na Figura 19, à esquerda o primeiro corte e à direita o corte final.

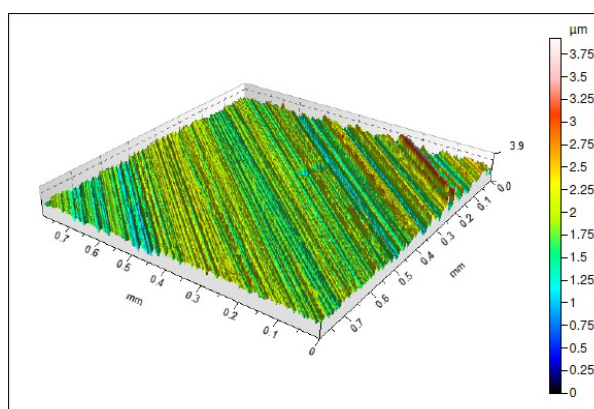
A seguir as amostras foram retificadas em ambos as superfícies na retificadora frontal do laboratório de fabricação da UTFPR com uso de rebolo de alumina pura de granulometria MESH 46.





**Figura 19 – Perfis de corte inicial e final das amostras**

As amostras obtidas apresentaram uma rugosidade superficial média de  $0,28\mu\text{m}$  medida no interferômetro marca Taylor Hobson modelo Talysurf CCI. Um exemplo da superfície da amostra após a retificação é mostrado na Figura 20.



**Figura 20 – Perfil de rugosidade das amostras após a retificação**

Finalmente as amostras foram cortadas com disco abrasivo na cortadeira automática do laboratório GrMatS da UTFPR. A Figura 21 mostra, da esquerda para a direita, uma amostra após a retificação, uma amostra após o corte por disco abrasivo e a amostra na posição de análise.



**Figura 21- Amostra após a retificação e corte com disco abrasivo**

### **3.1.3 Metalografia do Metal Base e do Revestimento**

Foram preparadas amostras do friso de roda. As amostras da região de solda foram cortadas no sentido transversal à direção de soldagem e embutidas em baquelite para análise metalográfica. A seguir as amostras foram lixadas até a lixa de granulometria MESH 600 e polidas com partículas de alumina em suspensão com granulometria 1 $\mu$ m. Utilizou-se como reagente químico de ataque solução de Nital com concentração de 5% por 10s a fim de se revelar a microestrutura metalográfica das amostras. A morfologia da solda foi avaliada por microscopia óptica e por macroscopia no laboratório de materiais da UTFPR.

### **3.1.4 Inspeção Amostral de Trincas e Inclusões no Revestimento Depositado**

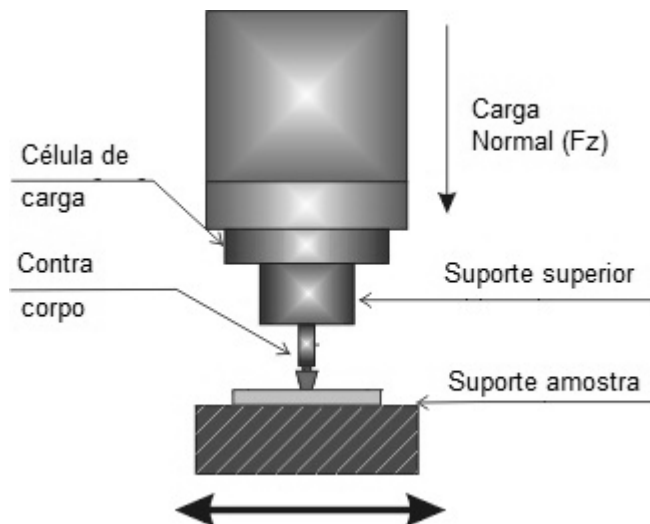
As trincas e a presença de inclusões foram avaliadas por inspeção visual direta e por meio da análise das metalografias obtidas no item 3.1.3.

### **3.1.5 Medição de Dureza Vickers do Metal Base e do Revestimento**

A dureza Vickers foi medida por microdurômetro através de toda a seção transversal do revestimento depositado até o material base. Utilizou-se carga de 50g aplicada durante 10s em cada medição. Foram realizadas 3 (três) medições para cada ponto em 3 (três) amostras distintas de regiões diferentes da roda, totalizando 9 (nove) medições para cada ponto. Os resultados apresentados neste trabalho são sempre obtidos da média dos resultados de cada condição com suas repetições.

### 3.1.6 Ensaio de Desgaste por Reciprocating do Metal Base e do Revestimento

Ensaio reciprocating é um ensaio de desgaste do tipo esfera-plano, cujo método padronizado pode ser verificado na norma ASTM G99-05. A amostra é fixada em uma mesa que possui movimento linear ajustável. Um motor elétrico é acoplado por um mecanismo de biela que converte o movimento rotativo do motor em movimento linear da mesa. Pressiona-se sobre a amostra um contra corpo com uma força controlada por célula de carga computadorizada e com sistema de amortecimento passivo. Desta maneira a força normal aplicada sobre a amostra mantêm-se constante durante todo o processo. A Figura 22 ilustra esquematicamente a disposição do equipamento.



**Figura 22 – Ilustração esquemática do equipamento de ensaio reciprocating**  
**Fonte: adaptado de CETR**

Foram realizados ensaios de desgaste por deslizamento sem lubrificação e à temperatura ambiente no metal base e no revestimento pelo método reciprocating de esfera sobre plano no tribômetro modelo UMT da marca CETR que se encontra na UTFPR. Utilizou-se esfera de carbeto de tungstênio com 4mm de diâmetro como contra-corpo. Após ensaios preliminares, determinaram-se os parâmetros de força normal em 7, 15 e 30N e os parâmetros de velocidade em 50, 70 e 100mm/s. Foram realizados ensaios para todas as combinações destas condições no metal base e no revestimento depositado, totalizando 18 condições. A distância linear de

deslizamento foi fixada em 5mm e o tempo de ensaio foi fixado em 15 minutos. A fim de se cumprir a recomendação da norma ASTM G99-05 foram realizados 3 ensaios em cada condição e os resultados apresentados neste trabalho são sempre obtidos da média dos resultados de cada condição com suas repetições.

### **3.1.7 Determinação da Composição Química do Metal Base, do Revestimento e das Trilhas de Desgaste por EDS**

Logo após a realização dos testes de desgaste, as amostras foram limpas por ultrassom em banho de álcool isopropílico por 20min e analisadas pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura em equipamento disponível na UTFPR. Na mesma ocasião, utilizou-se o método de dispersão de energia de raios-X (EDS) no Microscópio Eletrônico de Varredura para se determinar a composição química do Metal Base, do Revestimento e das Trilhas de Desgaste.

### **3.1.8 Determinação da Perda Volumétrica de Material por Interferometria**

As trilhas de desgaste obtidas nos ensaios de reciprocating foram observadas no interferômetro óptico da marca Taylor Hobson modelo Talysurf CCI do laboratório de metrologia da UTFPR. A superfície resultante foi tratada com filtro gaussiano em seus pontos e um perfil transversal gerado para cada condição analisada. A partir da área calculada pelo software Talysurf Lite, foram obtidos os valores para a perda volumétrica de material.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise Metalográfica e Perfil de Dureza

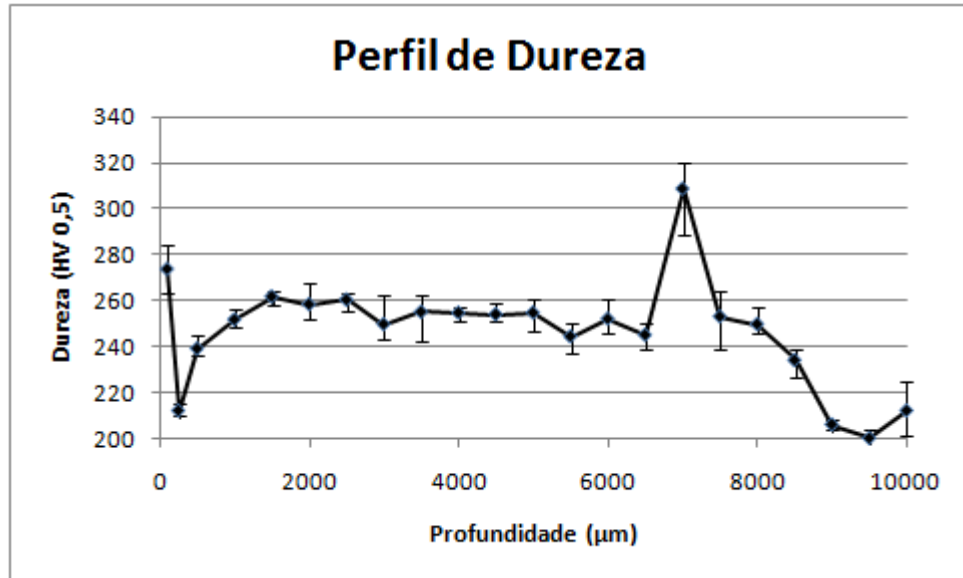
A Figura 23 mostra a macroestrutura da solda em seção transversal.



Figura 23 - Macroscopia da solda.

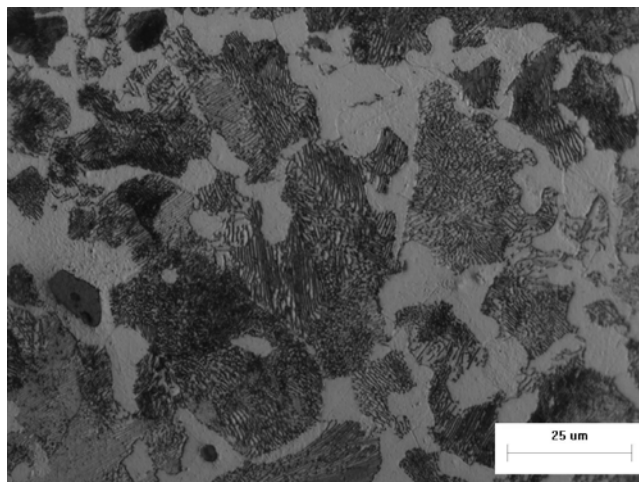
Observam-se três regiões distintas na solda, o revestimento depositado, a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal base.

A medição de microdureza Vickers resultou no perfil observado na Figura 24. A medição da microdureza do metal base resultou no valor de 212 HV<sub>0,5</sub>. Observam-se três regiões distintas ao longo do perfil de dureza da amostra compatíveis com as regiões observadas na Figura 23. A partir da superfície até aproximadamente 6,5mm de profundidade, observa-se um patamar de dureza média de 251 HV<sub>0,5</sub>. Entre 6,5 e 8,5mm ocorre um pico de 309 HV<sub>0,5</sub> na dureza em 7,0mm, seguido de uma redução para o patamar anterior de dureza. A partir de 9,0mm de profundidade não há mais variação na dureza nem na morfologia, sugerindo que esta região já se encontra fora da ZTA e pode ser considerada como metal base.



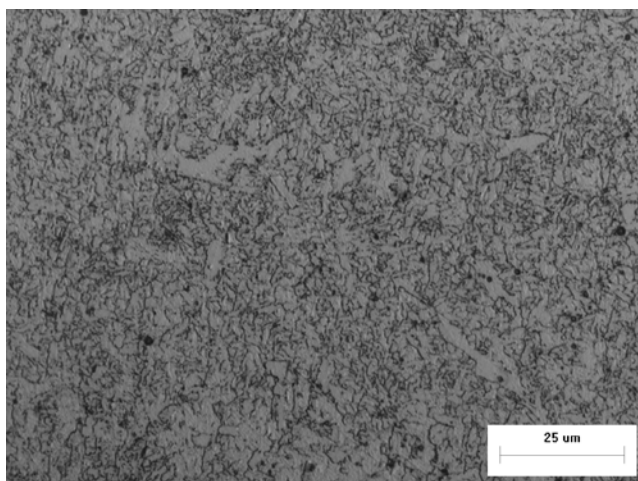
**Figura 24 - Perfil de dureza Vickers HV0,5 da solda**

Na Figura 25 observa-se a microestrutura perlítica lamelar em uma matriz ferrítica do metal base.



**Figura 25 - Micrografia metal base**

A microestrutura morfológica no revestimento depositado é exibida na Figura 26.



**Figura 26 - Metalografia do revestimento depositado**

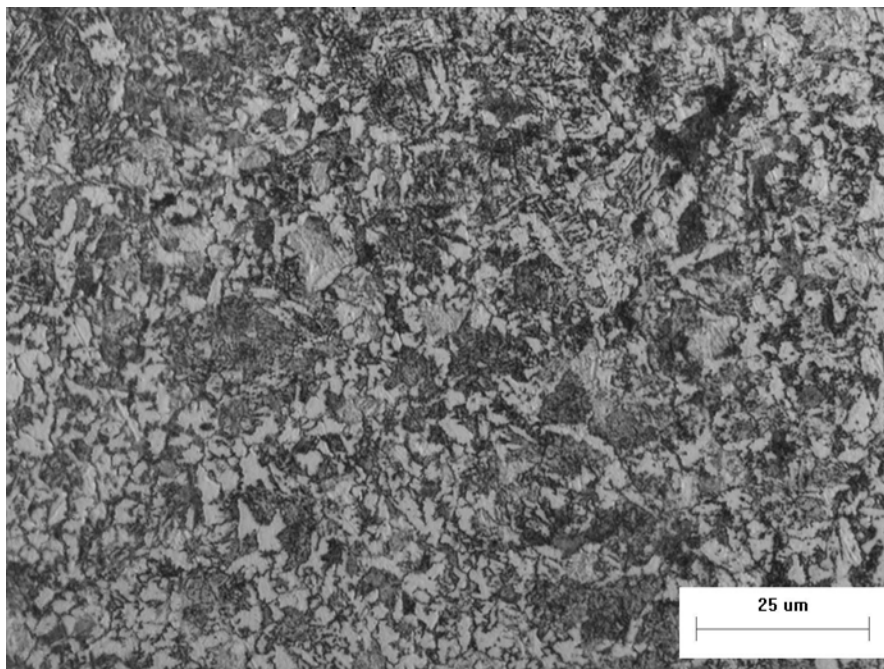
A microestrutura do revestimento é ferrítica, com teor de carbono inferior ao observado no metal base. Esta microestrutura se apresenta com uniformidade ao longo da região do material depositado.

A avaliação da composição química elementar obtida pela técnica EDS é mostrada com correção na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Observa-se que o teor de manganês é superior e ocorre a adição de Cromo no revestimento. O teor de carbono foi obtido por balanço das fases perlita e ferrita. Os valores apresentados estão em percentual por peso.

**Tabela 1 - Composição química do metal base e revestimento**

<b>Elemento</b>	<b>C (%wt.)</b>	<b>Si (%wt.)</b>	<b>Cr (%wt.)</b>	<b>Mn (%wt.)</b>	<b>Fe (%wt.)</b>
Metal Base	0.33	0.54	-	0.78	98.34
Revestimento	0.12	0.82	0.56	1.57	96.93

A microestrutura morfológica média encontrada na Zona Termicamente Afetada (ZTA) entre a região de diluição da solda e o metal base pode ser observada na Figura 27.

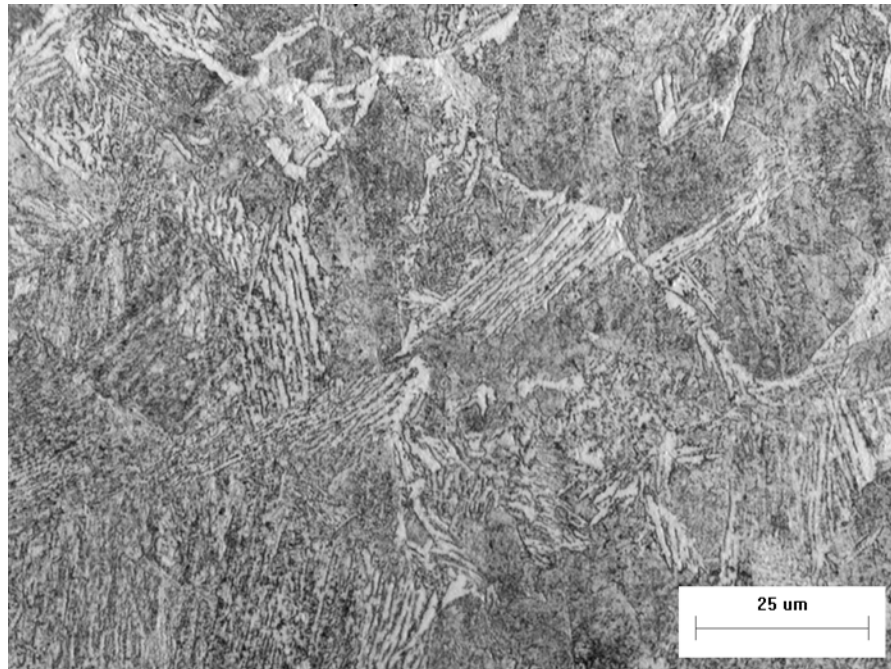


**Figura 27 - Metalografia da ZTA**

Observa-se uma microestrutura metálica mais refinada do que no metal base. O teor de carbono mantém-se praticamente inalterado, o que sugere que provavelmente não há alteração química. Porém, ocorre alteração metalúrgica evidenciada pelo refino de grão advindo do ciclo de aquecimento e resfriamento do início do processo.

As alterações metalúrgicas são mais evidentes na região de diluição da solda, entre 6,5 e 7,5mm de profundidade, conforme se pode observar na Figura 28.





**Figura 28 - Metalografia região de diluição.**

Na região de diluição, entre o revestimento e a ZTA, ocorreram os maiores gradientes de resfriamento, evidenciado pela presença de bainita verificada na Figura 28. Porém, com a continuidade da aplicação de calor, ocorreu um provável revenimento desta microestrutura.

Não há presença de vazios ou evidência de falta de fusão na interface entre o revestimento e metal base. Conclui-se, assim, que a solda produziu um material uniforme conforme esperado.

Não foi constatada a presença de trincas em nenhuma das amostras.

## 4.2 Análise de Desgaste

### 4.2.1 Análise dos resultados dos ensaios

Para avaliar corretamente as curvas de evolução de coeficiente de atrito ao longo do tempo, foi necessário fixar uma condição e variar as demais. A Figura 29 mostra as diferentes respostas de coeficiente de atrito para o metal base mantendo-se a força normal fixa em 8N e variando-se a velocidade do ensaio.

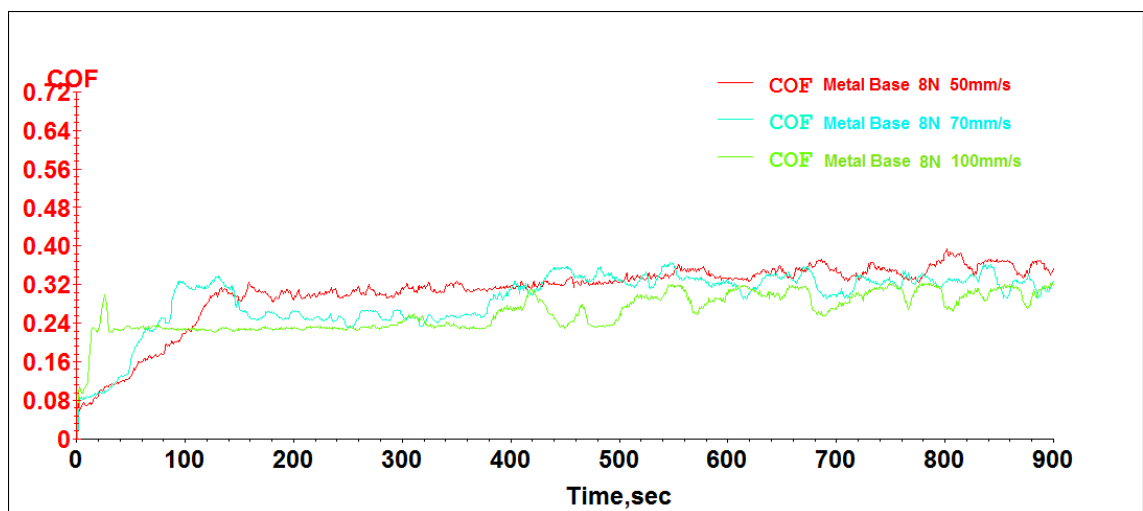
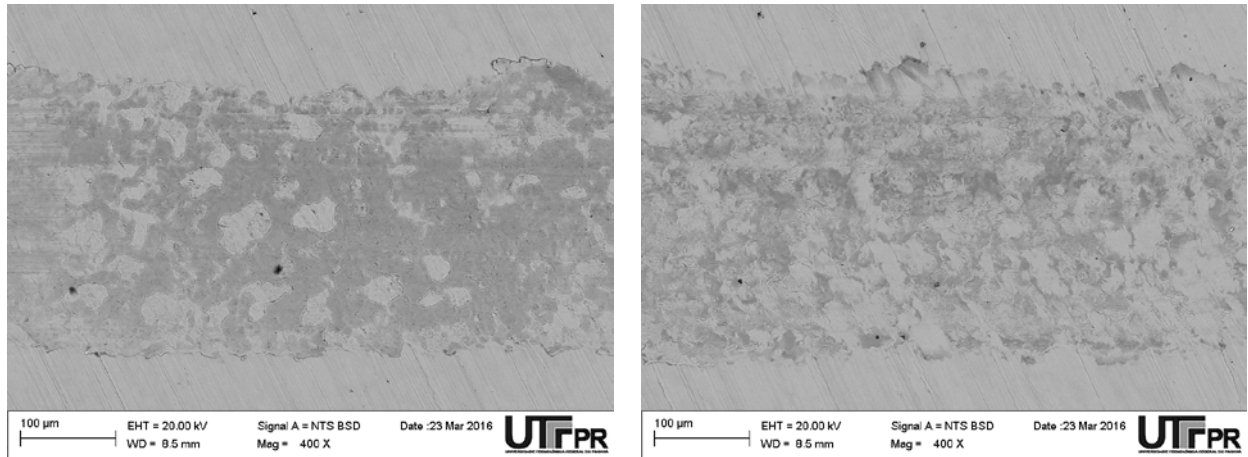


Figura 29 - Evolução do coeficiente de atrito no metal base com carga igual a 8N

Nas curvas apresentadas na Figura 29 observa-se a presença de instabilidade nos valores obtidos para o coeficiente de atrito. Esta instabilidade é tipicamente observada no desgaste oxidativo. Percebe-se que no ensaio à velocidade de 50mm/s, ocorre uma menor instabilidade e o maior valor médio para o coeficiente de atrito. Pode-se concluir que nesta condição de ensaio a taxa formação de óxidos superficiais é menor e com adesão reduzida destes à superfície da amostra. Há uma tendência de redução do coeficiente de atrito médio conforme se aumenta a velocidade do ensaio. Porém, a instabilidade devida ao ciclo do desgaste oxidativo também tende a aumentar após a provável formação da camada óxida. Este comportamento sugere que a taxa de oxidação aumenta com a velocidade de desgaste.

A Figura 30 mostra a micrografia por varredura de elétrons da trilha de desgaste do metal base com força normal de 8N e velocidades de 50 e 100mm/s. As regiões escuras foram confirmadas como sendo formadas por óxidos por meio da técnica EDS.



(a) 50mm/s

(b) 100mm/s

**Figura 30 - Micrografia por varredura de elétrons da trilha de desgaste do metal base com força normal de 8N e velocidades de 50 e 100mm/s**

Pode-se observar que o aumento da velocidade de desgaste tende tornar mais homogênea a distribuição das ilhas de óxidos, ao mesmo tempo em que estas se tornam individualmente menores. Este fenômeno explica a redução dos vales do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade, pois há mais área de contato dos óxidos com a esfera de titânio.

O perfil obtido por interferometria óptica corrobora a tese da formação das ilhas de óxidos nas trilhas de desgaste. Comparando-se as figuras Figura 31 e Figura 32, que mostram o perfil de desgaste do metal base com força normal de 8N respectivamente para 50 e 100mm/s, pode-se verificar a maior deformação plástica para a condição de maior velocidade.

Os resultados sugerem que a variação de velocidade utilizada não influenciou na profundidade e largura da trilha de desgaste. Porém, houve uma maior influência do desgaste adesivo em modo severo para a velocidade de 50mm/s do que para a de 100mm/s, evidenciado pela maior aspereza desta superfície.

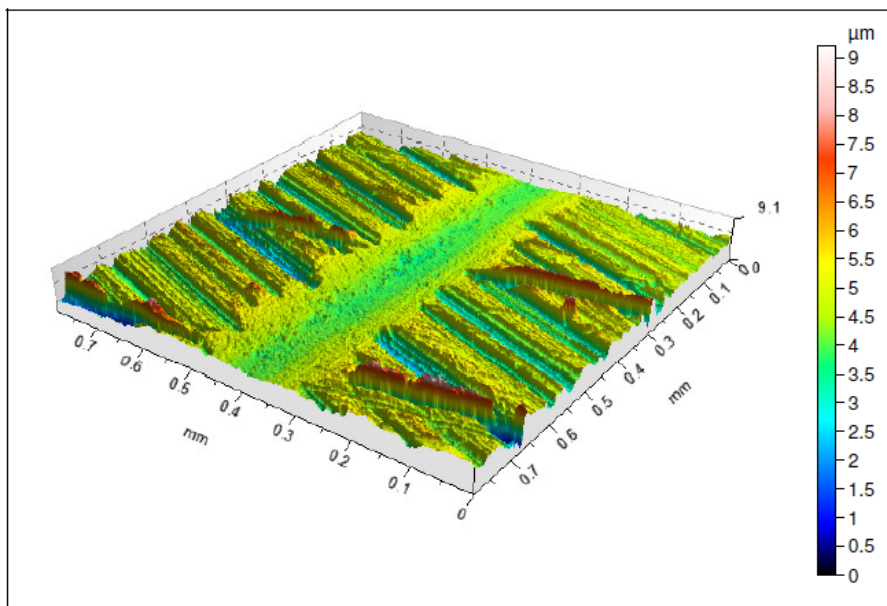


Figura 31 – Perfil da trilha de desgaste do metal base com força normal de 8N e velocidade 50mm/s

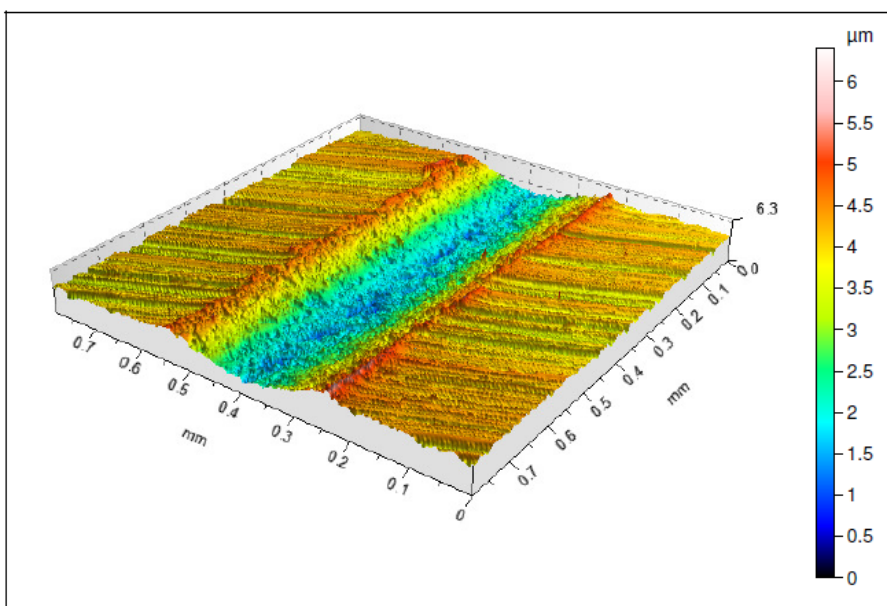


Figura 32 – Perfil da trilha de desgaste do metal base com força normal de 8N e velocidade 100mm/s

O comportamento obtido, em termos de coeficiente de atrito, para o revestimento nos ensaios de desgaste com força normal de 8N para as 3 velocidades de ensaio é mostrado na Figura 33.

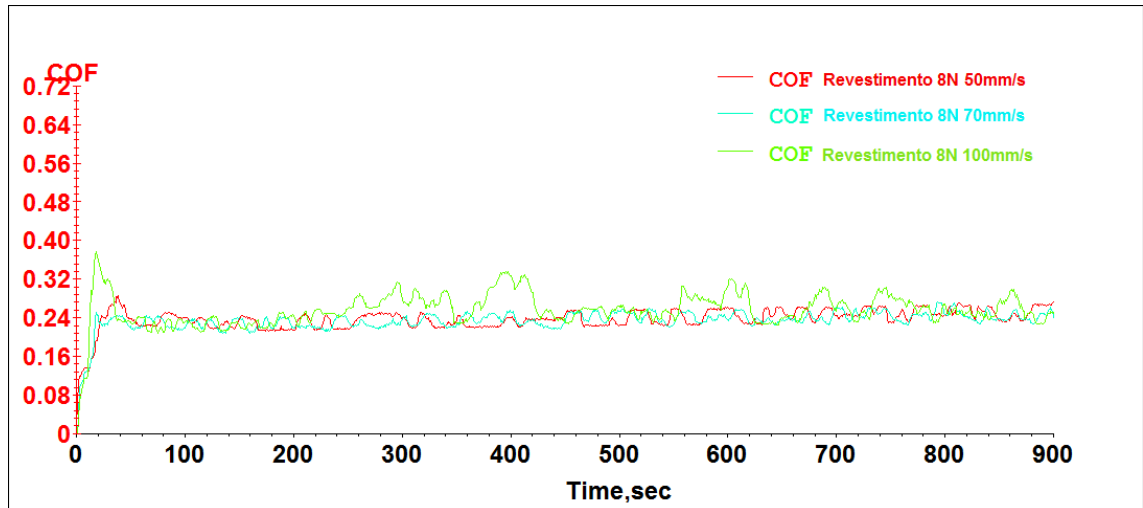
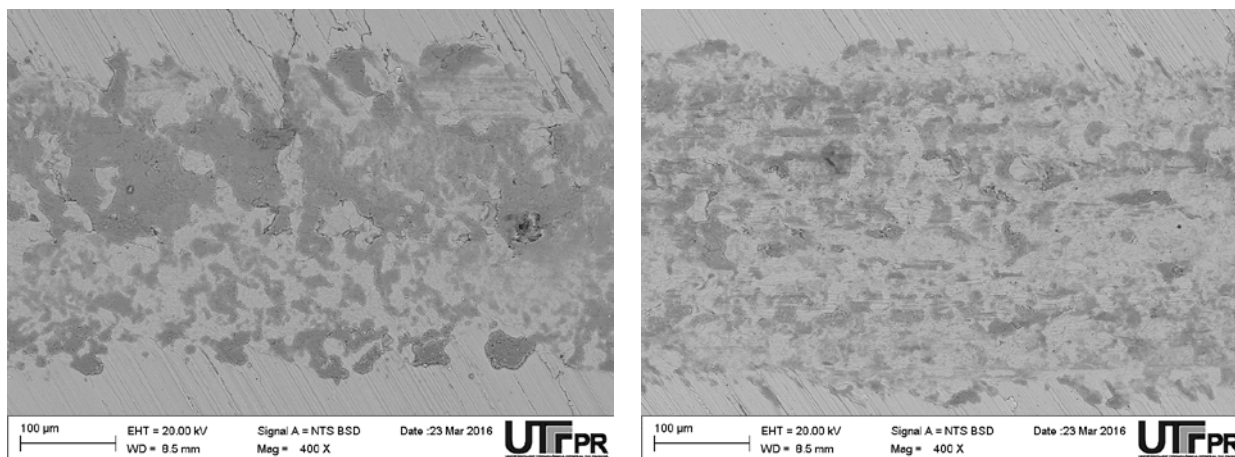


Figura 33 - Evolução do coeficiente de atrito no revestimento com carga igual a 8N

Observa-se que o coeficiente de atrito oscila ao longo do tempo de maneira análoga ao observado no metal base, devido aos ciclos de desgaste oxidativo. Contudo, para o revestimento não se verifica a variação expressiva do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade de deslizamento. Apenas para o ensaio à velocidade de 100mm/s há intervalos de tempo nos quais se observa uma maior variação na oscilação do coeficiente de atrito, que destoam da oscilação observada ao longo dos demais ensaios nesta condição de carga no revestimento. Este comportamento se assemelha ao verificado para o metal base na mesma condição.

Na Figura 34 verificamos a repetibilidade do comportamento de desgaste oxidativo do metal base no revestimento. São formadas ilhas de óxidos muito similares em tamanho e distribuição tanto na condição de velocidade igual a 50mm/s quanto para 100mm/s.

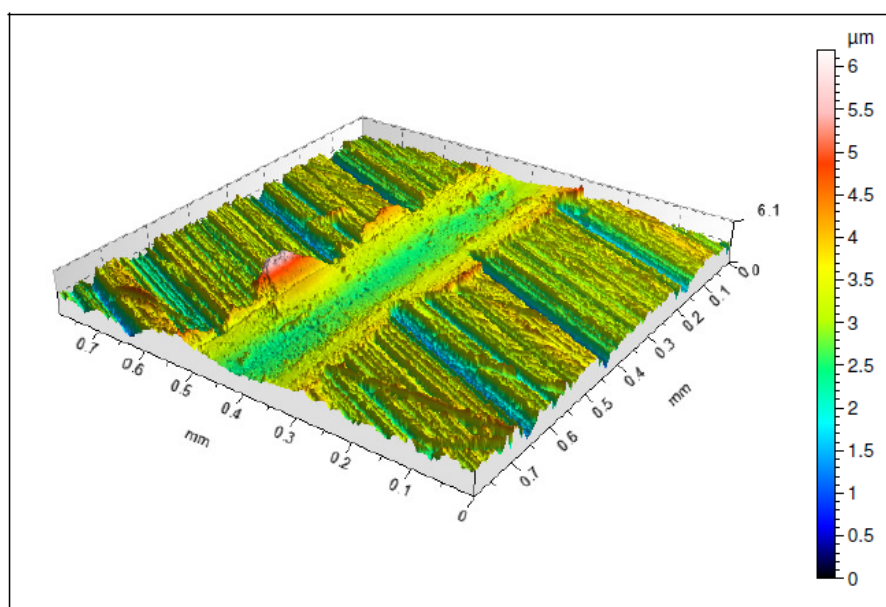


(a) 50mm/s

(b) 100mm/s

**Figura 34 - Micrografia por varredura de elétrons da trilha de desgaste do revestimento com força normal de 8N e velocidades de 50 e 100mm/s**

As figuras Figura 35 e Figura 36 mostram o perfil de desgaste do revestimento com força normal de 8N respectivamente para 50 e 100mm/s, pode-se verificar a maior deformação plástica para a condição de maior velocidade, condição similar à observada para o metal base. No revestimento houve uma pequena variação na largura da trilha de desgaste com o aumento da velocidade.



**Figura 35 – Perfil da trilha de desgaste do revestimento com força normal de 8N e velocidade 50mm/s**

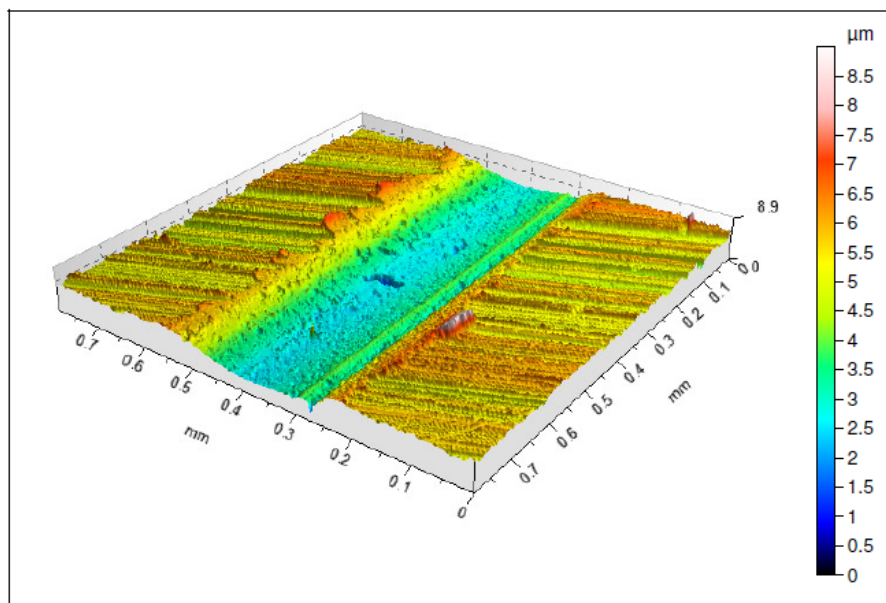


Figura 36 – Perfil da trilha de desgaste do revestimento com força normal de 8N e velocidade 100mm/s

Ocorre uma redução no coeficiente de atrito na condição de velocidade igual a 50mm/s no revestimento comparado com o metal base, conforme ilustrado na Figura 37. Esta variação deve-se provavelmente à maior dureza do revestimento (BATCHERLOR; STACHOWIAK, 2006).

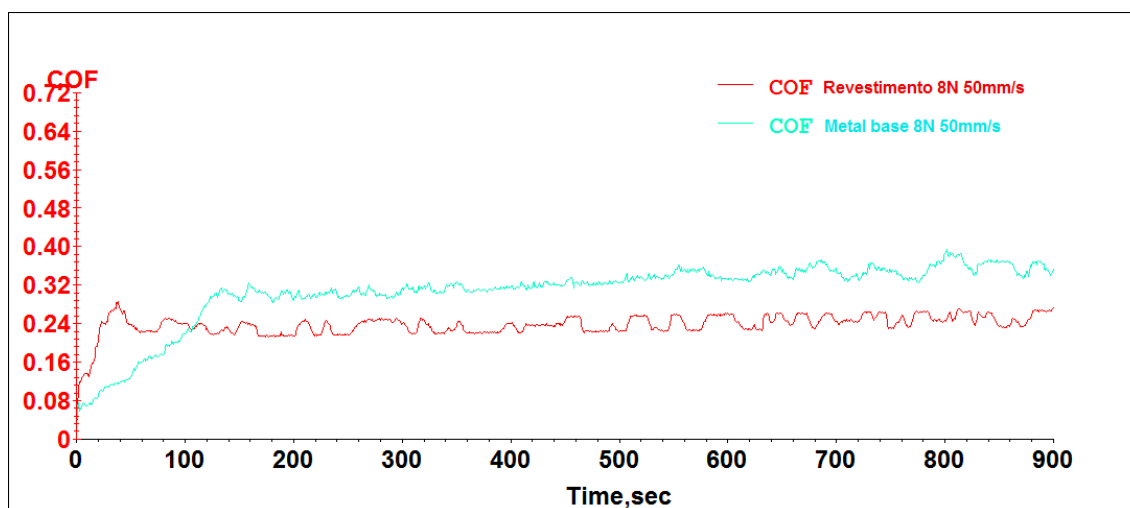


Figura 37 - Evolução do coeficiente de atrito com carga normal de 8N e velocidade de 50mm/s no metal base e no revestimento

Já na condição de carga normal igual a 8N e velocidade de 100mm/s apresentada na Figura 38 não se verifica a influência variação de dureza no coeficiente de atrito.

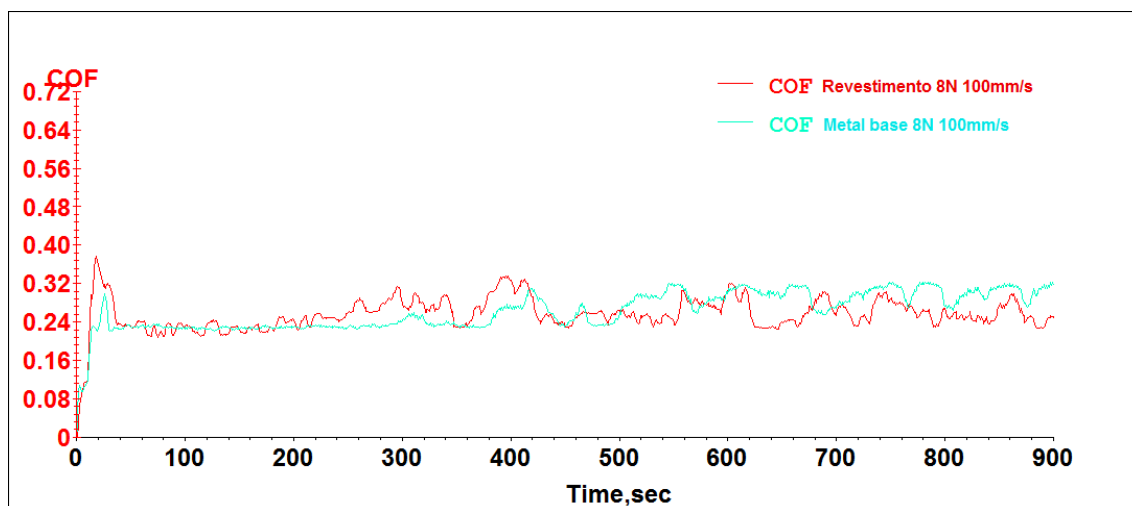


Figura 38 - Evolução do coeficiente de atrito com carga normal de 8N e velocidade de 100mm/s no metal base e no revestimento

Observa-se que para ambos os materiais o atrito inicia-se próximo de um patamar estável, mas tão logo a camada óxida atinja seu tamanho crítico tem início o ciclo de desgaste oxidativo.

Fixando-se a carga normal de 30N, obtemos as evoluções temporal do coeficiente de atrito para 50, 70 e 100mm/s para o metal base exibidas na Figura 39.

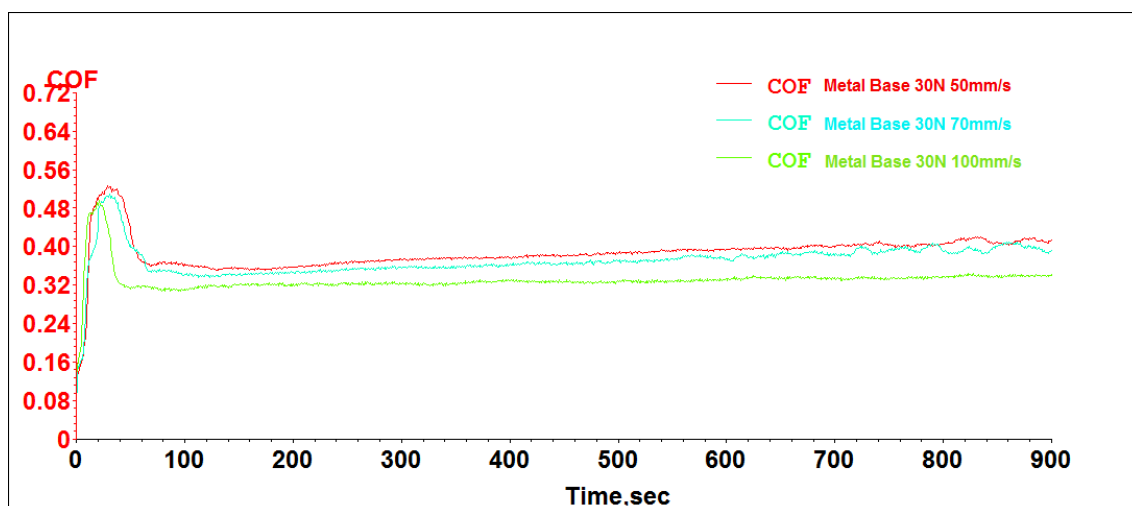
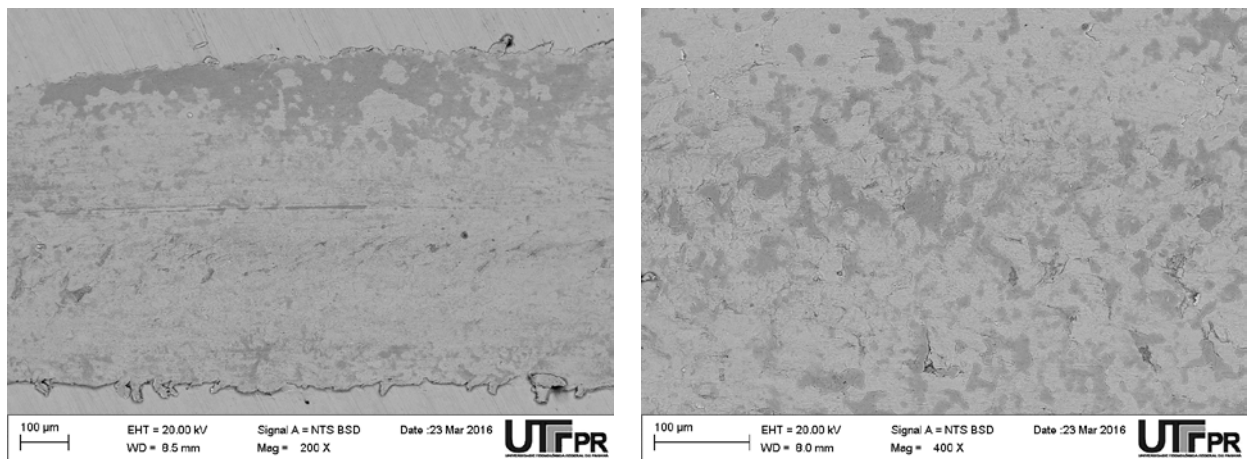


Figura 39 - Evolução do coeficiente de atrito no metal base com carga igual a 30N



Para a condição de mais alta carga, percebe-se a estabilização do coeficiente de atrito para todas as condições de velocidade. Batcherlor e stachowiak (2006) sugerem que este fenômeno pode ser explicado pela maior compactação dos debris óxidos na trilha de desgaste, formando uma camada mais uniforme e estável. A redução do atrito com o aumento da velocidade de ensaio corrobora a tese da camada de óxido mais estável. Este fenômeno já havia sido observado para a condição de carga normal igual a 8N. Pode-se inferir, assim, que o aumento da velocidade de desgaste realmente homogeneíza a camada de óxidos.

Na Figura 40 vemos a microscopia de varredura eletrônica das trilhas de desgaste para carga normal de 30N e velocidades de 50 e 100mm/s. Pode-se verificar que o fenômeno de compactação dos óxidos com o aumento da velocidade de ensaio se repete para esta condição de carga normal.

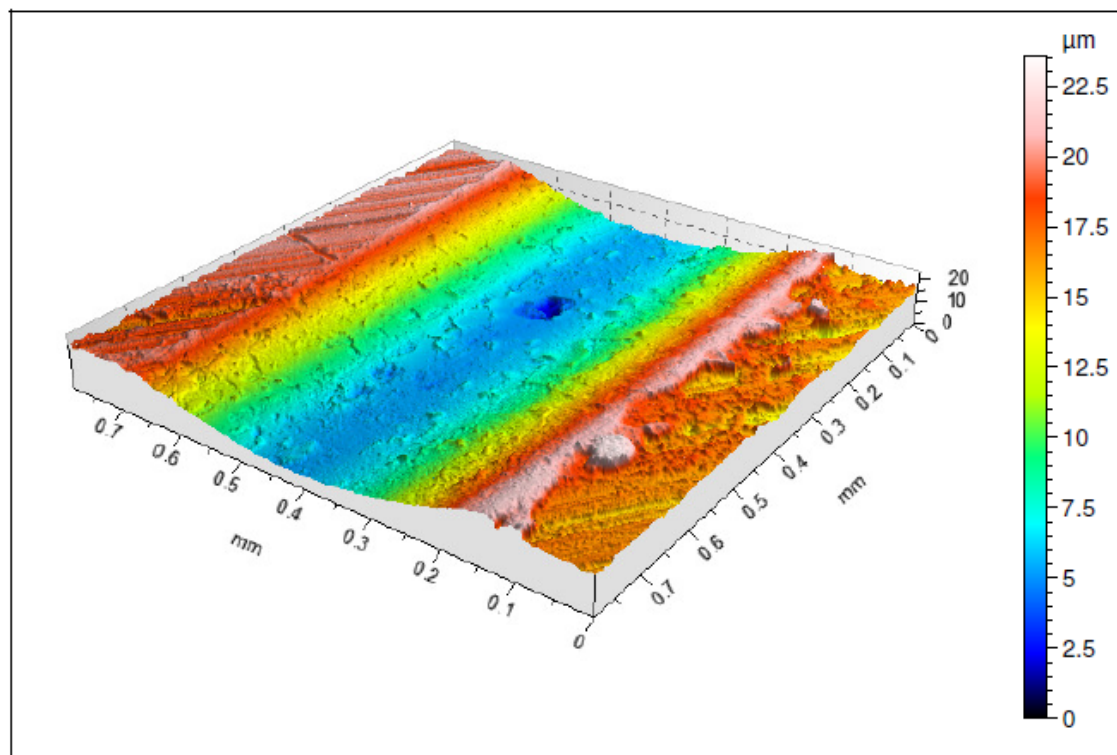


(a) 50mm/s

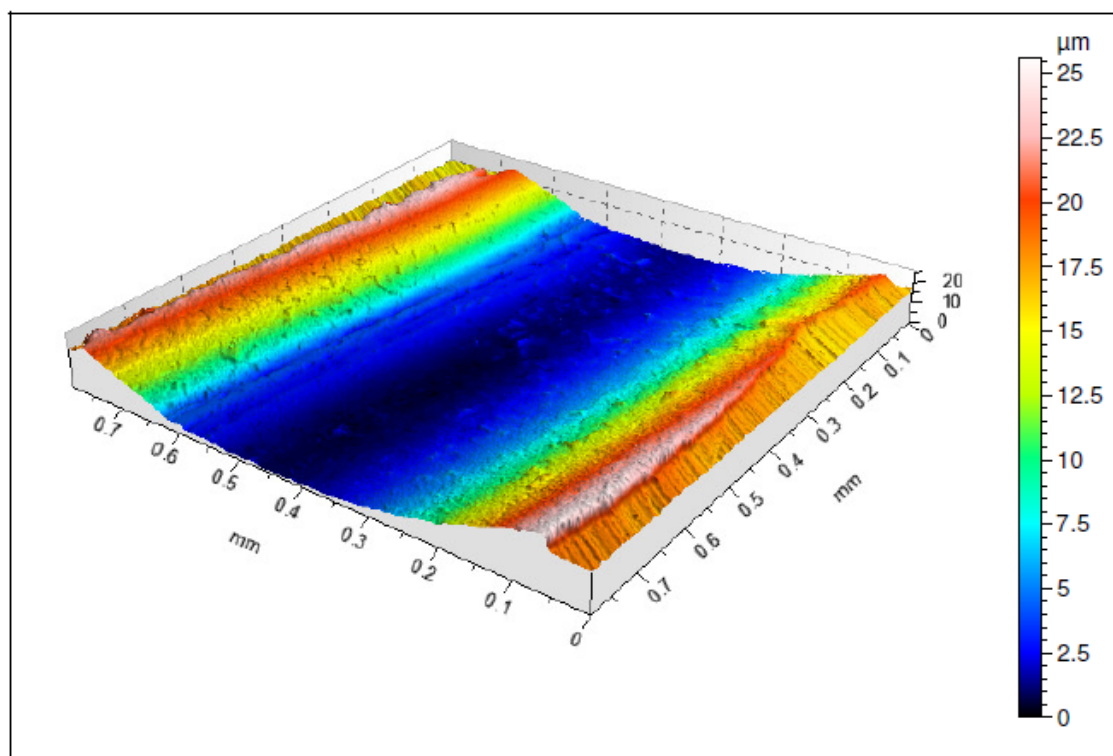
(b) 100mm/s

**Figura 40 – Micrografia por varredura de elétrons da trilha de desgaste do revestimento com força normal de 30N e velocidades de 50 e 100mm/s**

Nas figuras Figura 41 e Figura 42 são apresentados os perfis resultantes dos ensaios de desgaste com carga de 30N e velocidade de 50 e 100mm/s respectivamente. Em ambas as condições se observa uma superfície nas trilhas de desgaste menos rugosa do que para a condição de carga normal de 8N, porém ainda existem ilhas de óxidos. Este perfil apóia a tese da formação de camada óxida homogênea que explica a redução do atrito com o aumento simultâneo da carga e da velocidade.



**Figura 41 – Perfil da trilha de desgaste do revestimento com força normal de 30N e velocidade 50mm/s**



**Figura 42 – Perfil da trilha de desgaste do revestimento com força normal de 30N e velocidade 100mm/s**

Na Figura 43 compara-se a evolução do coeficiente de atrito com força normal de 30N à velocidade de 50mm/s do metal base e do revestimento. Verifica-se que ambas as condições apresentam um coeficiente de atrito estável. O revestimento possui uma condição de atrito ligeiramente menor do que o metal base.

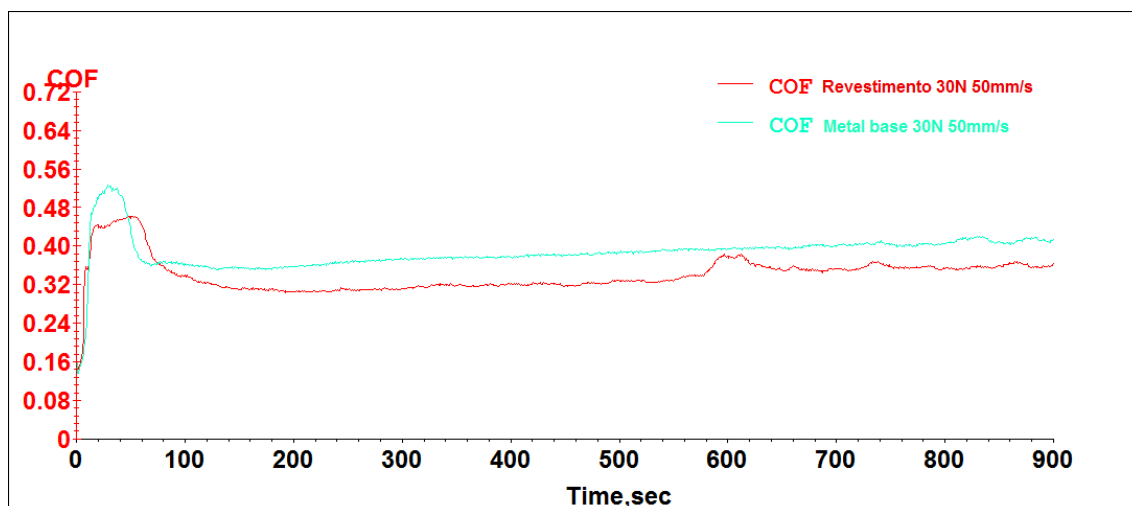


Figura 43 - Evolução do coeficiente de atrito com carga normal de 30N e velocidade de 50mm/s no metal base e no revestimento

A evolução do coeficiente de atrito com carga normal de 30N e velocidade de 100mm/s no metal base e no revestimento é ilustrada na Figura 44.

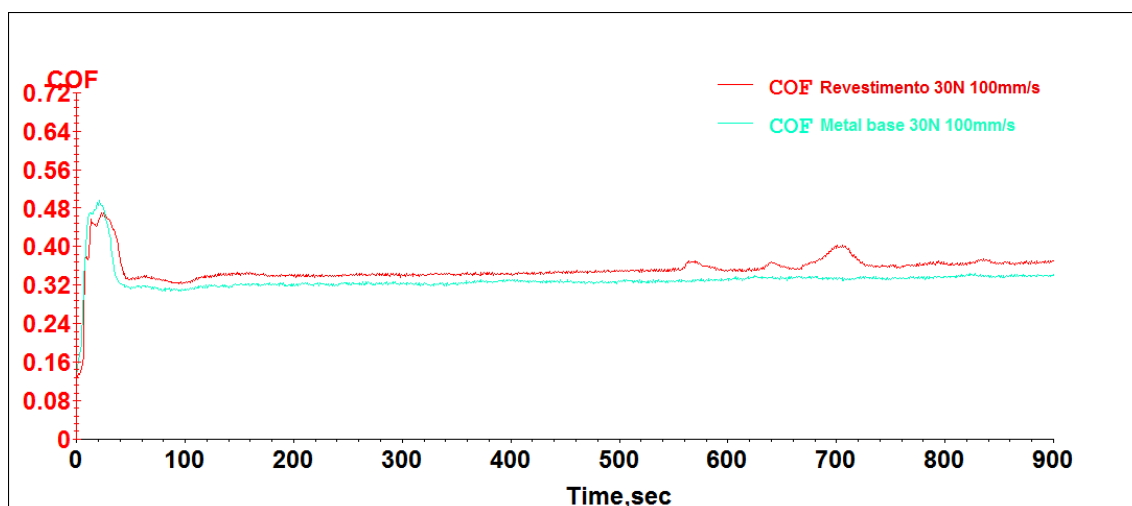


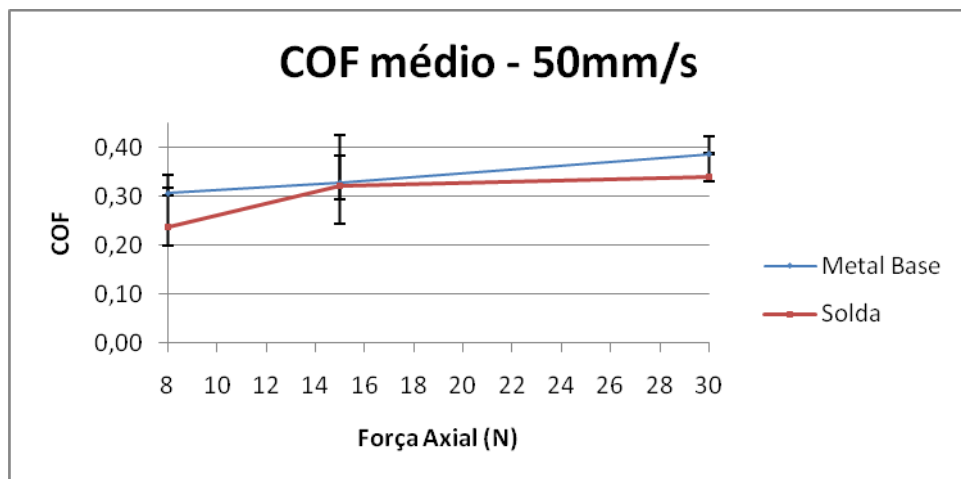
Figura 44 - Evolução do coeficiente de atrito com carga normal de 30N e velocidade de 100mm/s no metal base e no revestimento

Para a velocidade de 100mm/s e carga de 30N, ocorre novamente a estabilização do coeficiente de atrito ao longo do tempo. Percebe-se que nesta

condição a repetibilidade foi excepcionalmente boa, de maneira que a redução no coeficiente de atrito pode ser considerada como inexistente.

#### 4.2.2 Comparação do coeficiente de atrito do metal base e do revestimento

Os valores médios para o coeficiente de atrito obtidos em cada ensaio foram compilados para serem analisados graficamente. A Figura 45 compara a evolução do coeficiente de atrito no metal base e no revestimento para as cargas de 8, 15 e 30N



**Figura 45 - Coeficiente de atrito médio para ensaios com velocidade de 50mm/s**

Observa-se que em ambos os materiais existe uma tendência de aumento do coeficiente de atrito médio com o aumento da força normal. Esta tendência pode ser verificada para as demais condições de velocidade nas figuras Figura 46 e Figura 47 que ilustram a variação do coeficiente de atrito em função do aumento da força normal para as velocidades de ensaio de 70 e 100mm/s respectivamente.

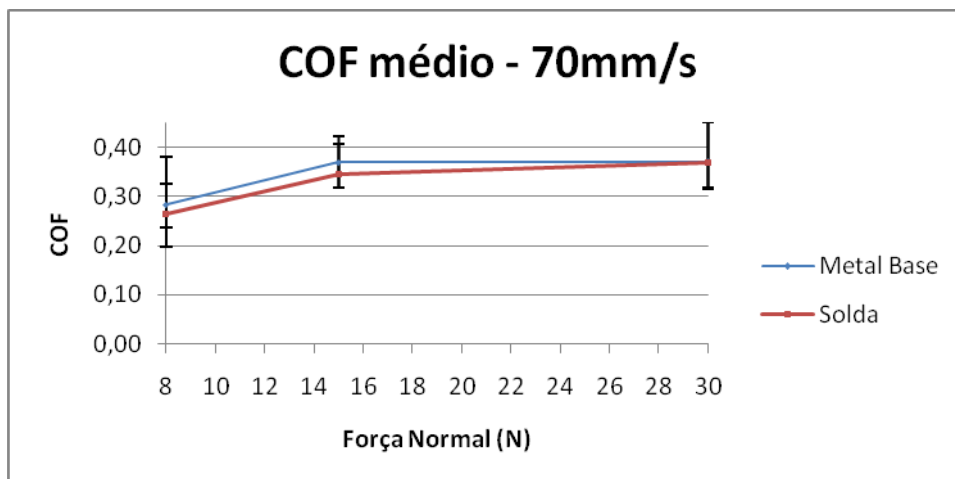


Figura 46 - Coeficiente de atrito médio para ensaios com velocidade de 70mm/s

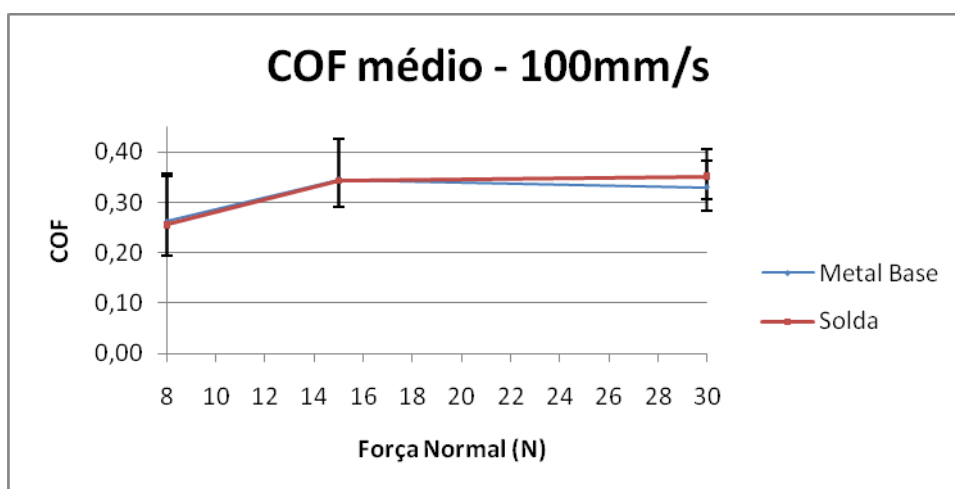


Figura 47 - Coeficiente de atrito médio para ensaios com velocidade de 100mm/s

Conforme já discutido no item 4.2.1, o aumento da força normal pode aumentar a compactação dos debrís óxidos, criando uma camada óxida mais homogênea sobre as trilhas de desgaste. Contudo, a taxa de remoção destes debrís é proporcional à variação da força normal, pois a deformação dos picos de rugosidades é mais expressiva. O resultado obtido para o coeficiente de atrito é a soma dos efeitos destes dois fenômenos simultaneamente.

Pode-se avaliar a influência da velocidade de ensaio na evolução do coeficiente de atrito fixando-se as forças axiais. A Figura 48 apresenta a evolução do coeficiente de atrito com a variação da velocidade linear de ensaio para a força normal fixada em 8N.

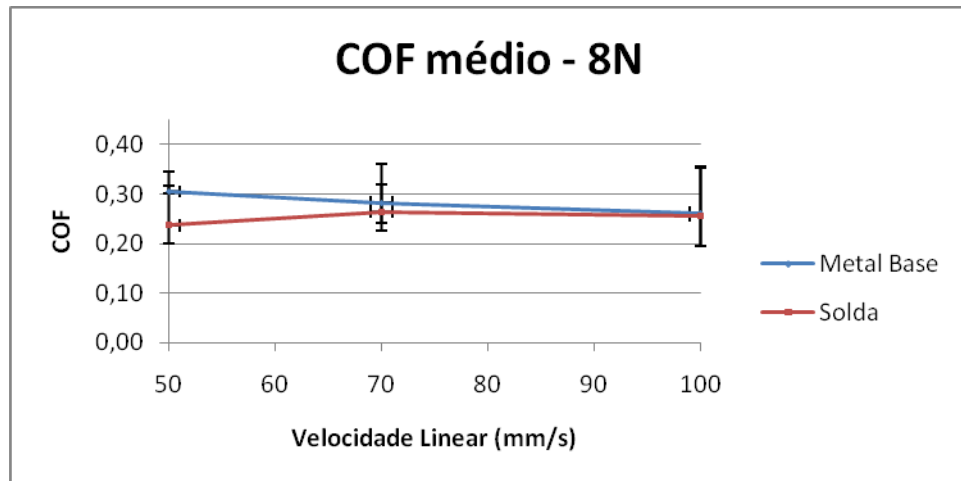


Figura 48 - Coeficiente de atrito médio para ensaios com força normal de 8N

Observa-se que o coeficiente de atrito tende a permanecer constante para as condições de velocidade linear ensaiadas, permitindo-se concluir que no sistema tribológico analisado a variação da velocidade exerceu menor influência sobre a variação das forças de atrito geradas nos ensaios de reciprocating. Este efeito se repete para as demais forças normais utilizadas, observável nas figuras Figura 49 e Figura 50 que ilustram a evolução do coeficiente de atrito com a variação da velocidade linear de ensaio para a força normal fixada em 15 e 30N respectivamente.

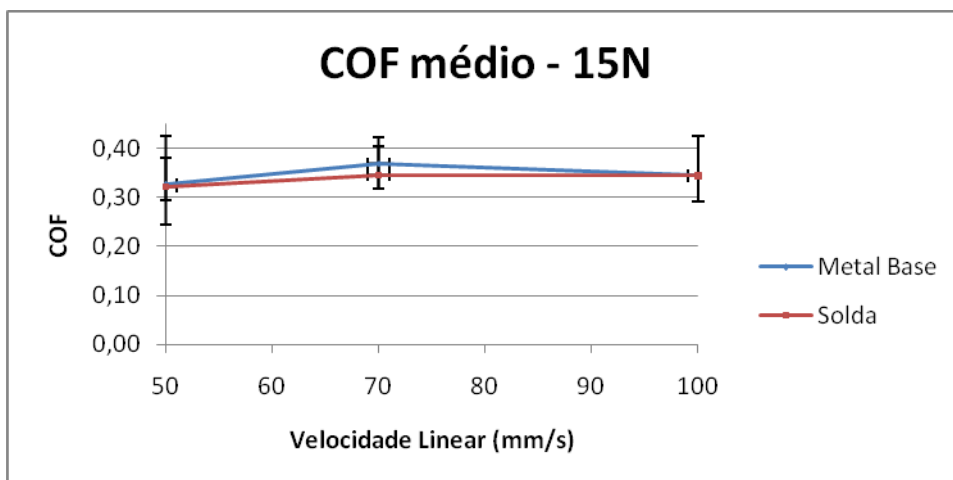


Figura 49 - Coeficiente de atrito médio para ensaios com força normal de 15N

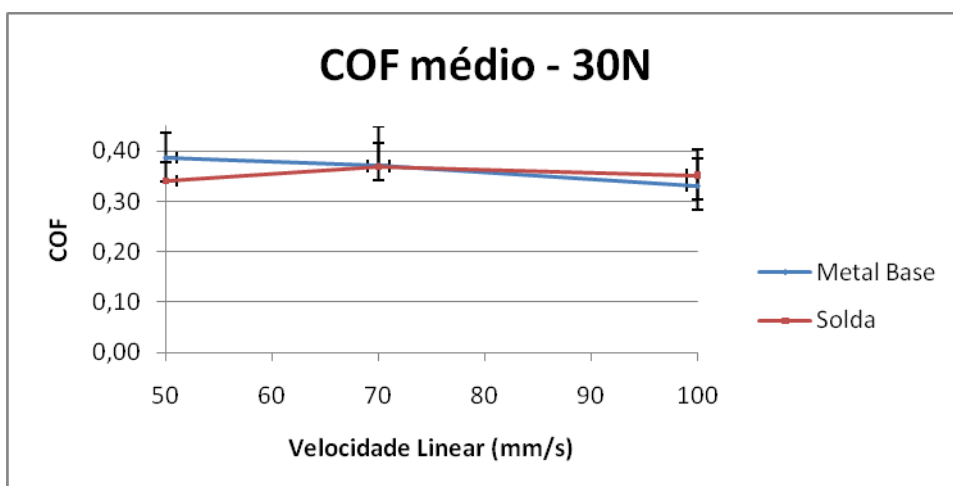


Figura 50 - Coeficiente de atrito médio para ensaios com força normal de 30N

#### 4.2.3 Comparação da perda volumétrica normalizada no metal base e no revestimento

Avaliou-se a perda volumétrica normalizada ao através da área de material removido obtido por perfilamento ótico. A Figura 51 apresenta a perda volumétrica normalizada para as forças normais de 8, 15 e 30N para a velocidade fixa de 50mm/s.

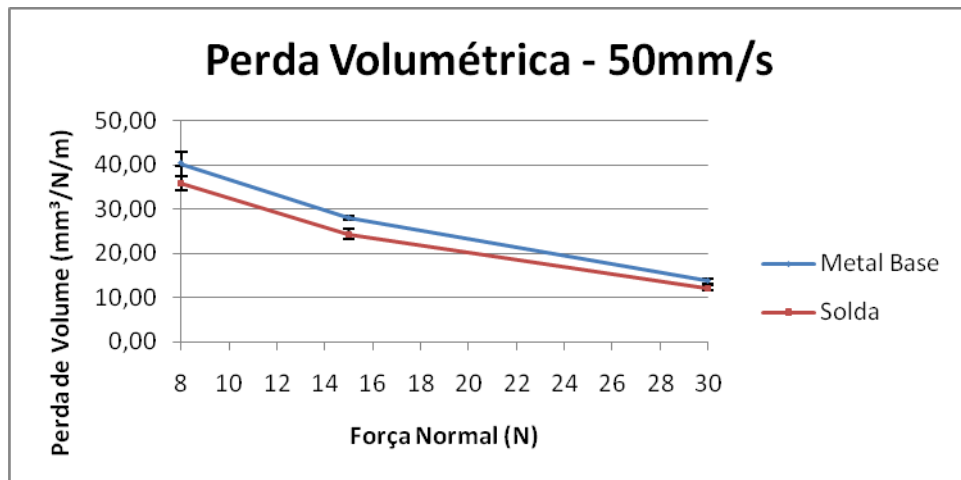


Figura 51 – Perda volumétrica normalizada para velocidade de 50mm/s

Observa-se a redução da perda volumétrica normalizada com o aumento da carga normal. Este fenômeno pode ser explicado pela formação de uma camada de óxidos mais homogênea sobre a trilha de desgaste ou adesão do material da esfera na trilha de desgaste. Assim, observa-se que a taxa de remoção de material não está relacionada apenas às forças de atrito geradas nos ensaios. Há a superposição dos efeitos da alteração da superfície, provocada pela variação da força normal, e do atrito gerado em cada superfície em cada instante de tempo (BATCERLOR; STACHOWIAK, 2006).

Nas figuras Figura 52 e Figura 53 que apresentam a perda volumétrica normalizada para as forças normais de 8, 15 e 30N para a velocidade fixa de 70 e 100mm/s respectivamente, observa-se a repetibilidade da redução da perda volumétrica com o aumento da força normal.



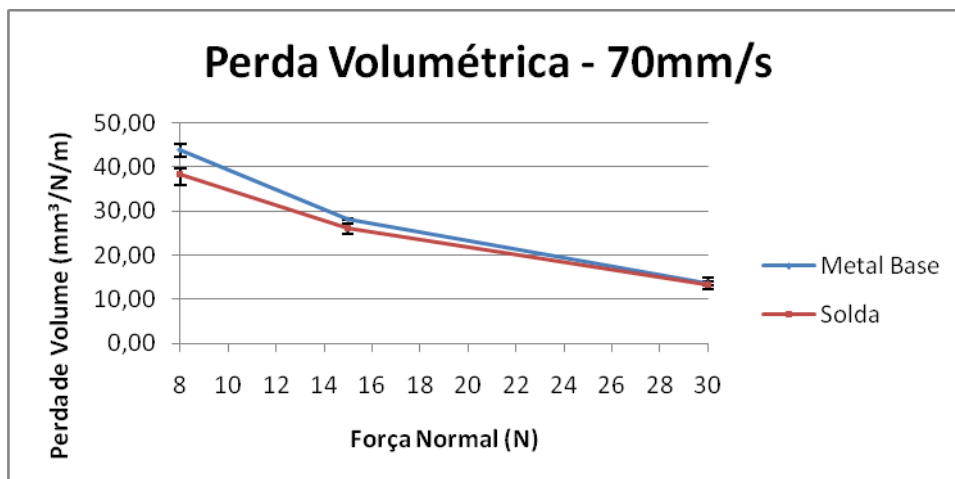


Figura 52 – Perda volumétrica normalizada para velocidade de 70mm/s

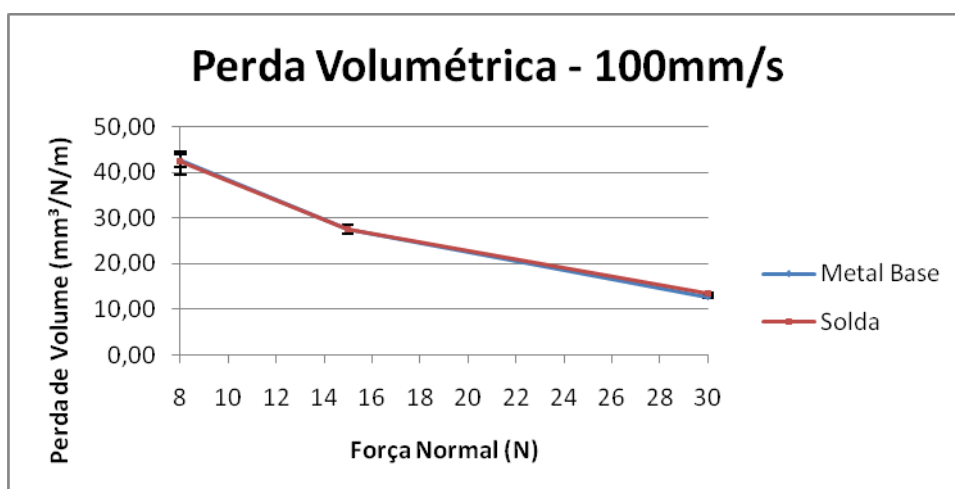


Figura 53 – Perda volumétrica normalizada para velocidade de 100mm/s

A Figura 54 apresenta a perda volumétrica normalizada para carga normal de 8N. Observa-se que a variação da velocidade de ensaio teve uma influência desprezável na taxa de perda volumétrica normalizada.

Nas figuras Figura 55 e Figura 56 que apresentam a perda volumétrica normalizada para as velocidades de deslizamento de 50, 70 e 100mm/s para a força normal fixa de 15 e 30N respectivamente, observa-se a repetibilidade da estabilidade da perda volumétrica normalizada para as condições de velocidade de deslizamento estudadas.

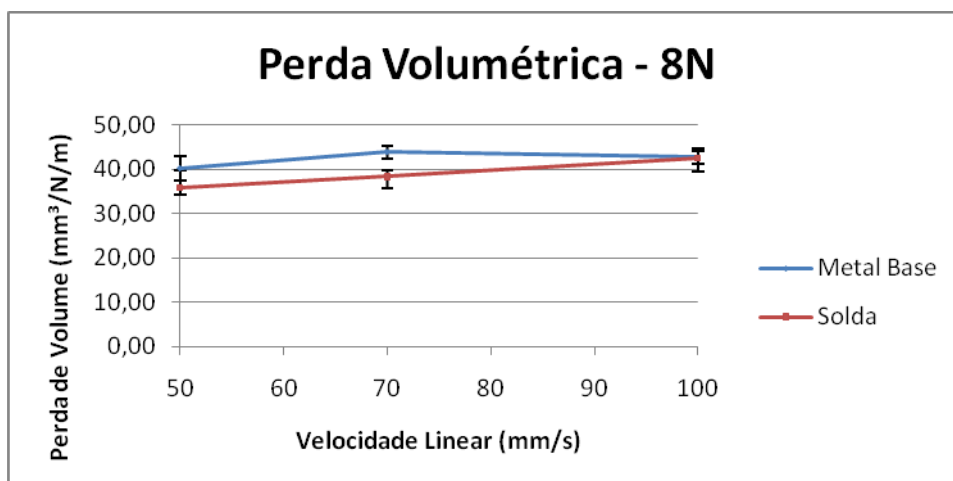


Figura 54 – Perda volumétrica normalizada para carga normal de 8N

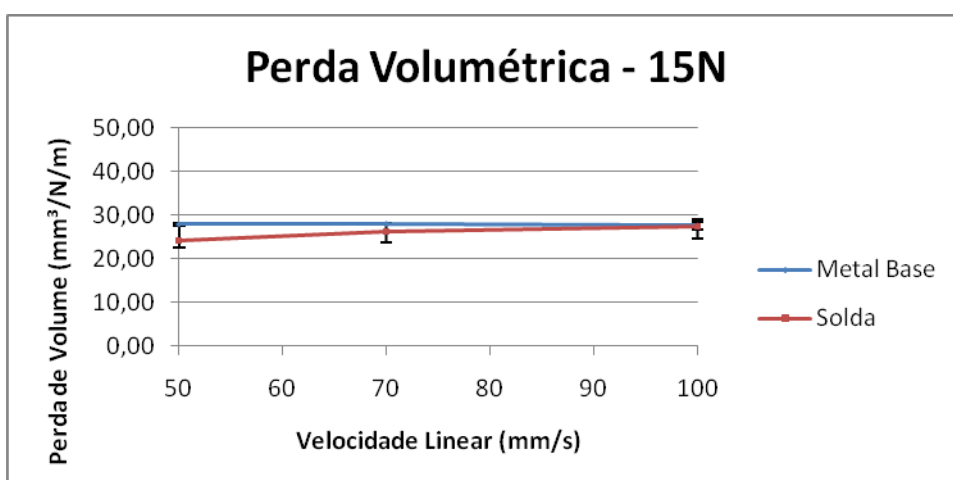


Figura 55 – Perda volumétrica normalizada para carga normal de 15N

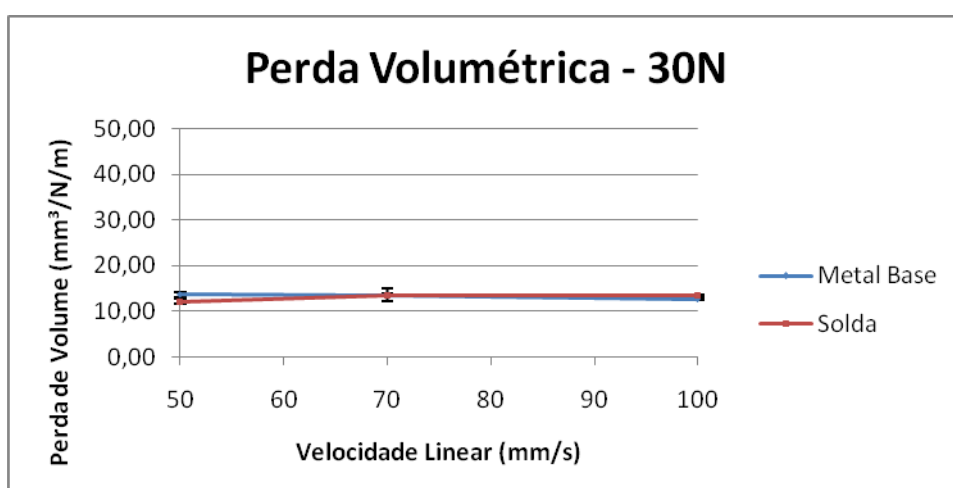


Figura 56 – Perda volumétrica normalizada para carga normal de 30N

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho é possível concluir que:

- A microestrutura metalográfica apresentada é perlita em matriz ferrítica em ambas as condições, sendo que o metal base apresenta maior teor de carbono.
- O revestimento depositado possui uma dureza estável de aproximadamente 260HV ao longo da seção, dureza superior à obtida para o metal base de 212HV.
- A partir de 9mm de profundidade não há influência do processo no material da roda.
- Ocorre principalmente desgaste oxidativo nos parâmetros de ensaio e amostras utilizados neste trabalho.
- A evolução temporal do coeficiente de atrito ocorre da mesma maneira no metal base e no revestimento.
- A perda volumétrica normalizada no metal base e no revestimento é a mesma para os mesmos parâmetros de ensaio.
- Conclui-se que, apesar de haver diferenças química, morfológica e de dureza entre o metal base e o revestimento depositado, as características do friso de roda ferroviário frente ao desgaste são recuperadas.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**. Miami: AWS, 1978.

ARAUJO, Márcia Regina Vieira de. **Caracterização Microestrutural do Metal de Solda Depositado por Arco Submerso em Chapas de Aço-carbono Estrutural**. 2006. 119 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006

BATCHELOR, Andrew W. ; STACHOWIAK, Gwidon W. **Engineering Tribology**. Inglaterra: Butterworth Heinemann, 2006.

BLAU, Peter, J. **Friction Science and Technology: from Concepts to Applications**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2009

CANTERA, F. Investigation of wheel flange wear on the Santander FEVE rail - a case study. **Wear**. [S.l.]. v. 162-164, part B, p. 975-979, abr.1993.

CETR, **Durability Testing of Electrical Contacts**. Disponível em <[http://www.cetr.com/Brochures/Durability\\_Testing\\_Electrical\\_Contacts.htm](http://www.cetr.com/Brochures/Durability_Testing_Electrical_Contacts.htm)>. Acesso em 20 de março de 2016.

ESAB Brasil S. A. **Catálogo de Consumíveis**. São Paulo: ESAB, 2013. 37p.

GERDAU S. A. **Arames para Solda**. Porto Alegre: GERDAU, 2013. 6p.

HUTCHINGS, lam M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Oxford: Arnold, 1992.

JING, Ying; ISHIDA, Makoto; NAMURA, Akira. Experimental Simulation and Prediction of Wear of Wheel Flange and Rail Gauge Corner. **Wear**. [S.l.]. v. 271, p. 259-267, out. 2010.

MARQUES, P.V. **Tecnologia da soldagem**. Belo Horizonte: ESAB, 1991

NETO, Adgenor Lima. **O Desgaste de Rodas e o Processo de Reperfilamento**. 2006. 62 p. Monografia. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006

PARANHOS, R. ; SOUZA, A.C. **Soldagem a Arco Submerso**, Coleção Soldagem 2000. Rio de Janeiro, 1999.

SISDELI, Armando. **Estudo de Desgastes de Rodas e suas Consequências no Material Rodante e na Via Permanente**. 2006. 124 p. Monografia. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006

TOURNAY, Harry; **Managing Rail and Wheel Interaction**; África do Sul; Fevereiro 1997.

WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D.H. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgar Blucher, 1992.