

MATHEUS SANTANA RAMOS

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE  
REVESTIMENTOS DE INCONEL 625 NO DESGASTE POR  
DESLIZAMENTO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2018

MATHEUS SANTANA RAMOS

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE  
REVESTIMENTOS DE INCONEL 625 NO DESGASTE POR  
DESLIZAMENTO**

**Projeto de Conclusão de Curso**  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de  
Uberlândia, como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de **BACHAREL em**  
**ENGENHARIA MECÂNICA.**

Orientador: Prof. Dr. Washington Martins da  
Silva Jr.

**UBERLÂNDIA– MG**

**2018**

MATHEUS SANTANA RAMOS

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE REVESTIMENTOS DE  
INCONEL 625 NO DESGASTE POR DESLIZAMENTO**

Projeto de conclusão de curso \_\_\_\_\_  
pelo Colegiado do Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica da Faculdade de  
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de  
Uberlândia.

Banca examinadora:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Washington Martins da Silva Jr. – UFU – Orientador

\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Regina Paula Garcia Santos – UFU

\_\_\_\_\_  
Prof. MSc. Vinícius Carvalho Teles – UFU

**Uberlândia, 05 de dezembro de 2018.**

*Hoje, agradeço primeiramente a Deus por ter me capacitado para que eu concluísse esse trabalho. Agradeço aos meus pais, Maria Aparecida e Cleuler, que não mediram esforços para me apoiar, auxiliar e dar carinho nos momentos mais difíceis.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Dr. Mário Martins de Oliveira Junior, por toda assistência prestada durante a elaboração dessa pesquisa, que foi de suma importância.

Ao Dr. José Lúcio Gonçalves Junior por fornecer as amostras, aos colegas do LTM, em especial ao Danilo Batista Melo, por auxiliar na operação da máquina utilizada nos ensaios e ao professor, orientador e amigo Dr. Washington Martins da Silva Junior pela orientação, paciência e por passar de forma eficiente seus conhecimentos aos seus alunos, a sua dedicação à profissão permite que bons trabalhos sejam concluídos.

Ramos, M. S. **Avaliação do comportamento tribológico de revestimentos de Inconel 625 no desgaste por deslizamento.** 2018. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

### **Resumo**

O presente trabalho objetivou avaliar a resistência ao desgaste por deslizamento do aço A36 revestido com Inconel 625, comparando com outros dois revestimentos, um de aço inoxidável 316 e outro de Inconel 625 sobreposto ao aço inoxidável 316. As amostras foram lixadas e polidas. Para realizar os ensaios, foi utilizado o Tribômetro Universal Plint® (modelo TE 67 Plint and Partners LDT) na configuração movimento alternado. A carga de teste utilizada foi de 21,5 N e o contra corpo adotado foram esferas de 10 mm. Foram feitos três ensaios para cada amostra. Após a realização dos testes, foi verificado que, apesar de possuir um coeficiente de atrito maior que a amostra com revestimento de aço inox, a amostra de revestimento com Inconel 625 apresenta menor desgaste.

**Palavras-chave:** Desgaste por deslizamento alternado, Inconel, Tribologia.

Ramos, M. S. **Evaluation of the tribological behavior of 625 inconel coatings in slip wear.** 2018. Graduation Project, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Brazil.

### **Abstract**

The purpose of this study was to evaluate the sliding wear resistance of the A36 steel coated with Inconel 625 in comparison to another two coatings: 1- 316 stainless steel and 2- Inconel 625 superimposed on 316 stainless steel. The samples were sanded and polished. Tests were performed in the Universal Plint® Tribometer (model TE 67 Plint and Partners LDT) using the reciprocating configuration. The test load was set to 21.5 N and the counter body was 10 mm steel beads. Three tests were performed in each sample. Despite having a coefficient of friction higher than the sample with stainless steel coating, the Inconel 625 coating sample presented a lower wear rate.

**Keywords:** Alternating slip wear, Inconel, Tribology.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Geometria empregada no teste de desgaste por deslizamento.....	19
<b>Figura 2:</b> Contatos concentrados, conforme (a) e não conforme (b).....	20
<b>Figura 3:</b> Diagrama TTT da liga 625.....	22
<b>Figura 4:</b> Ilustração do Tribômetro Plint TE67 utilizado nos ensaios.....	27
<b>Figura 5:</b> Gráfico que mostra o momento onde é definido o regime permanente.....	28
<b>Figura 6:</b> Gráfico do coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos na amostra A.....	29
<b>Figura 7:</b> Gráfico em 3D que mostra a reação de coeficiente de atrito, posição da esfera sobre a amostra A e o número de ciclos.....	30
<b>Figura 8:</b> Gráfico do coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos na amostra I.....	31
<b>Figura 9:</b> Gráfico em 3D que mostra a relação de coeficiente de atrito, posição da esfera sobre a amostra I e o número de ciclos.....	32
<b>Figura 10:</b> Gráfico do coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos na amostra M.....	33
<b>Figura 11:</b> Gráfico em 3D que mostra a reação de coeficiente de atrito, posição da esfera sobre a amostra M e o número de ciclos.....	34
<b>Figura 12:</b> Gráfico comparativo de coeficiente de atrito médio das três amostras.....	35
<b>Figura 13:</b> Imagens confocais de amostras (a) A, (b) I, (c) M.....	36
<b>Figura 14:</b> Taxa de desgaste das amostras após 30 min de deslizamento.....	37
<b>Figura 15 -</b> Imagens de microscopia eletrônica de varredura BSE das amostras revestidas (a) A, (b) I, (c) M. ....	38
<b>Figura 16:</b> Gráfico do segundo ensaio da amostra A que relaciona o coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos da amostra.....	43
<b>Figura 17:</b> Gráfico em 3D do segundo ensaio da amostra A que relaciona o coeficiente de atrito com o número de ciclos e com a posição da esfera sobre a amostra A.....	44
<b>Figura 18:</b> Gráfico do terceiro ensaio da amostra A que relaciona o coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos da amostra.....	44

<b>Figura 19:</b> Gráfico em 3D do terceiro ensaio da amostra A que relaciona o coeficiente de atrito com o número de ciclos e com a posição da esfera sobre a amostra.....	45
<b>Figura 20:</b> Gráfico do segundo ensaio da amostra I que relaciona o coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos da amostra.....	46
<b>Figura 21:</b> Gráfico em 3D do segundo ensaio da amostra I que relaciona o coeficiente de atrito com o número de ciclos e com a posição da esfera sobre a amostra.....	46
<b>Figura 22:</b> Gráfico do terceiro ensaio da amostra I que relaciona o coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos da amostra.....	47
<b>Figura 23:</b> Gráfico em 3D do terceiro ensaio da amostra I que relaciona o coeficiente de atrito com o número de ciclos e com a posição da esfera sobre a amostra.....	47
<b>Figura 24:</b> Gráfico do segundo ensaio da amostra M que relaciona o coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos da amostra.....	48
<b>Figura 25:</b> Gráfico em 3D do segundo ensaio da amostra M que relaciona o coeficiente de atrito com o número de ciclos e com a posição da esfera sobre a amostra.....	49
<b>Figura 26:</b> Gráfico do terceiro ensaio da amostra M que relaciona o coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos da amostra.....	49
<b>Figura 27:</b> Gráfico em 3D do terceiro ensaio da amostra M que relaciona o coeficiente de atrito com o número de ciclos e com a posição da esfera sobre a amostra.....	50

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Composição química do Inconel 625 .....	14
<b>Tabela 2:</b> Composição química do aço inoxidável 316.....	24
<b>Tabela 3:</b> Parâmetros de soldagem da amostra A.....	25
<b>Tabela 4:</b> Parâmetros de soldagem da amostra I.....	25
<b>Tabela 5:</b> Parâmetros de soldagem da amostra M.....	26
<b>Tabela 6:</b> Parâmetros utilizados nos ensaios.....	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LTM- Laboratório de Tribologia e Materiais

Ni- Níquel

Ta- Tântalo

Mm- milímetro

$\gamma$ - Fase gama

M- Martensita

C- Carbono

TTT- Tempo, Temperatura e Transformação

Mo- Molibdênio

Nb- Nióbio

NbC- Carboneto de nióbio

MIG- Metal Inert Gas

MAG- Metal Active Gas

Ar- Argônio

He- Hélio

ABNT- Associação Brasileira de Normas

SAE- Society of Automotive Engineers

AISI- American Iron and Steel Institute

Mn- Manganês

P- Fósforo

S- Enxofre

Si- Silício

Ni- Níquel

Cr- Cromo

UM- Tensão

Valim- Velocidade de alimentação

VSOLD- Velocidade de soldagem

IM- Intensidade de corrente

M- metro

V- Volt

Cm- centímetro

A- Ampère

CO2- gás carbônico

ERNiCrMo- Inconel 625

UFU- Universidade Federal de Uberlândia

Hz- Hertz

LVDT- Linear Variable Differential Transformer

2D- 2 dimensões

3D- 3 dimensões

N- Newton

BSE- Imagens de elétrons retroespalhados

## SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução.....	14
1.1 Justificativa e Relevância.....	16
1.2 Objetivos.....	17
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	18
2.1 Desgastes por deslizamento.....	18
2.2 Inconel 625.....	21
Capítulo 3 – Metodologia.....	24
3.1 Amostras.....	24
3.2 Equipamentos.....	26
3.3 Ensaios.....	27
Capítulo 4 – Resultados e Discussão.....	29
Capítulo 5 – Conclusões.....	39
Capítulo 6 - Trabalhos futuros.....	40
Referências Bibliográficas.....	41
Anexo I.....	43

## CAPÍTULO 1

### Introdução

Inconel é caracterizada por ser uma família de superligas de Níquel, desenvolvida na década de 1940, por pesquisadores ingleses. Seu principal elemento é o Níquel e, normalmente, o Cromo é o segundo elemento.

Essas famílias, usualmente, são aplicadas pelo processo de soldagem e possuem excelentes propriedades mecânicas, tais como resistência à corrosão e oxidação, e permitem trabalhar em ambientes submetidos a altas temperaturas, pois nessas circunstâncias, o Inconel forma uma camada espessa e estável de óxido que protege a superfície das peças do ambiente ao qual estão expostas.

O Inconel 625, será estudado nesse trabalho, pois possui a seguinte composição mostrada na Tab. 1:

**Tabela 1- Composição química do Inconel 625.**

<b>Elemento Químico</b>	Níquel (mín.)	Cromo	Carbono (máx.)	Ferro (máx.)	Molibdênio	Ni+Ta	Manganês (máx.)	Silício (máx.)
<b>%</b>	58	20 - 23	0,1	5	8 - 10	3,15 - 4,15	0,5	0,5

Fonte: <http://www.realum.com.br/inconel2.php>

Possui uma excelente resistência à fadiga, boa soldabilidade e uma resistência excepcional e tenacidade, devido à adição de Nióbio, que atuando com o molibdênio endurece a matriz da liga. Esta liga resiste a uma grande variedade de ambientes corrosivos e é especialmente a corrosão por pite e em fresta. Apesar das boas qualidades, as superligas possuem um custo relativamente elevado, tornando mais viável a utilização das mesmas como revestimento de materiais de menor custo, garantindo grande redução de custos e aplicando-as apenas na superfície, onde são realmente necessárias através da solda. Nos últimos anos, a aplicação pelo processo de aspensão térmica vem ganhando espaço devido à velocidade de aplicação, qualidade técnica e menores custos.

O Inconel 625 é utilizado abundantemente em poços de petróleo, que constituem um ambiente muito agressivo devido às diversas substâncias que podem ser encontradas como,

compostos oxigenados, nitrogenados, água, sais minerais, entre outros. Um dos maiores problemas encontrados nesses ambientes é em relação à corrosão dos materiais utilizados nos poços (tubulações, por exemplo). É utilizado frequentemente também em peças de turbina submetidas a elevadas temperaturas.

O estudo do desgaste por deslizamento do Inconel 625 é importante para mostrar que, além de ser utilizado em ambientes corrosivos, o material também pode ser utilizado em ambientes onde ocorre o deslizamento entre um corpo e sua superfície. No presente trabalho, através de ensaios e geração de gráficos será mostrada que é possível e viável a utilização do mesmo em revestimentos para trabalhar em ambientes onde ocorre o desgaste por deslizamento, expondo que é possível obter características de resistência à corrosão e resistência mecânica ao deslizamento.

### **1.1. Justificativa e Relevância**

O estudo do uso do Inconel 625 mostra-se de fundamental importância, já que essas superligas possuem um papel importante quando usadas em ambientes corrosivos, porém devem-se levar em consideração outros tipos de desgaste, que serão abordados nesse material. Grandes investimentos em pesquisas e desenvolvimento de novos materiais e tecnologias tornam necessários para diminuir o máximo possível esses problemas causados durante o trabalho em ambientes corrosivos. Esses investimentos abrangem o desenvolvimento de processos de soldagem e a aplicação de novos materiais como os revestimentos, bem como sua soldabilidade, para serem utilizados como revestimento de materiais de menor custo em dutos e outros equipamentos, por exemplo.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento e as vantagens de se utilizar uma superfície revestida com Inconel 625. Será apresentado o comportamento tribológico no desgaste por deslizamento, comparando o material revestido com Inconel 625 a outros revestimentos, em relação ao coeficiente de atrito e o desgaste superficial.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve revisão sobre o processo de desgaste por deslizamento que utilizaremos no nosso trabalho, mostrando os princípios do processo, além de trazer um estudo sobre o Inconel.

#### 2.1 Desgastes por deslizamento

No contato entre duas superfícies em movimento relativo há uma dificuldade no movimento provocada pelas forças de atrito. Ocorre a dissipação da energia empregada na movimentação dos materiais devido a estas forças. Ocorre também o desgaste dos componentes de sistemas mecânicos, reduzindo a vida útil dos mesmos (JÚNIOR, 2013, p.1).

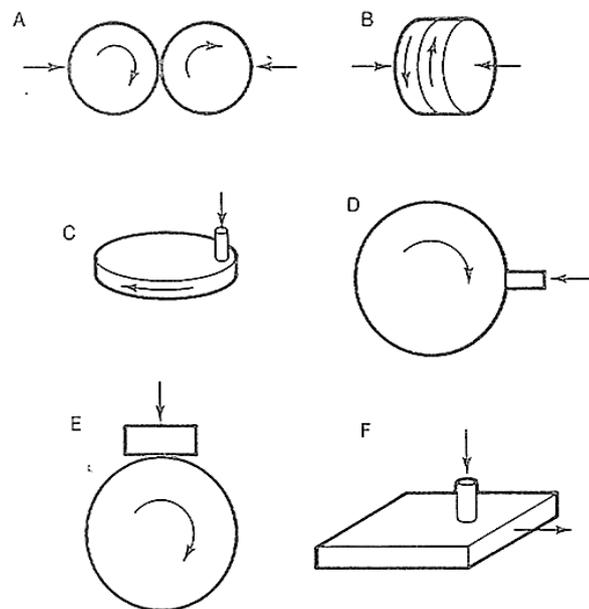
Pesquisas recentes apontaram que, nos países industrializados, o custo anual foi cerca de 5 a 7% dos produtos nacionais brutos em relação ao desgaste e energia dissipada. Ou seja, fazendo a redução ou eliminação da perda de energia por atrito haveria uma melhoria na economia destes países, trazendo até melhorias na preservação do meio ambiente, pois com isso se utiliza menos recursos energéticos (ERDEMIR e MARTIN, 2007, p.2).

Ao fazer testes para medir o desgaste por deslizamento, sabe-se que apresentam alta dispersão os resultados de atrito e desgaste entre dois materiais, que é consequência da natureza aleatória dos fenômenos envolvidos na interação entre os corpos. Como causa, podemos citar o não conhecimento do conteúdo dinâmico de parâmetros como a rugosidade das amostras, a dinâmica das interações entre asperezas no contato das amostras e as flutuações dinâmicas devido às vibrações provocadas pela excitação estrutural da máquina. Com essas excitações, pode haver flutuações de forças e movimentos na direção normal e tangencial às amostras. As flutuações, se ocorrerem, afetam as medições de força de atrito, produzindo dispersões nos resultados tribológicos de atrito e desgaste (FARÍAS e col., 2000, p.3). Segundo KUMAR e SWARNAMANI (1997, p.4), a combinação dos materiais em contato, os parâmetros de ensaio (carga e velocidade) e as características do sistema de ensaio (frequência natural, inércia das fixações e componentes) influenciam nas vibrações

induzidas pela força de atrito. Logo, o monitoramento das vibrações poderia detectar mudanças nas superfícies em contato.

Diferentes experimentos foram testados para medir o desgaste por deslizamento. As práticas laboratoriais geralmente são utilizadas para estudar os mecanismos de desgaste ou para simular algo que ocorre no mundo real e fornecer dados de projeto sobre taxas de desgaste e coeficiente de atrito.

A palavra tribômetro, referindo a equipamentos para medir atrito foi empregada pela primeira vez em 1774 por Leonardo da Vinci. A Fig. 1 mostra alguns tipos de arranjos geométricos usados em vários tipos de aparelhos de teste de desgaste, nela podemos dividir os métodos em dois tipos: aqueles em que as superfícies deslizantes são dispostas de forma simétrica, nas quais, se os materiais forem idênticos, as taxas de desgaste devem ser iguais, e a disposição mais comum, onde o sistema é assimétrico, nos quais dois corpos deslizantes, de materiais iguais, provavelmente terão diferentes taxas de desgaste.

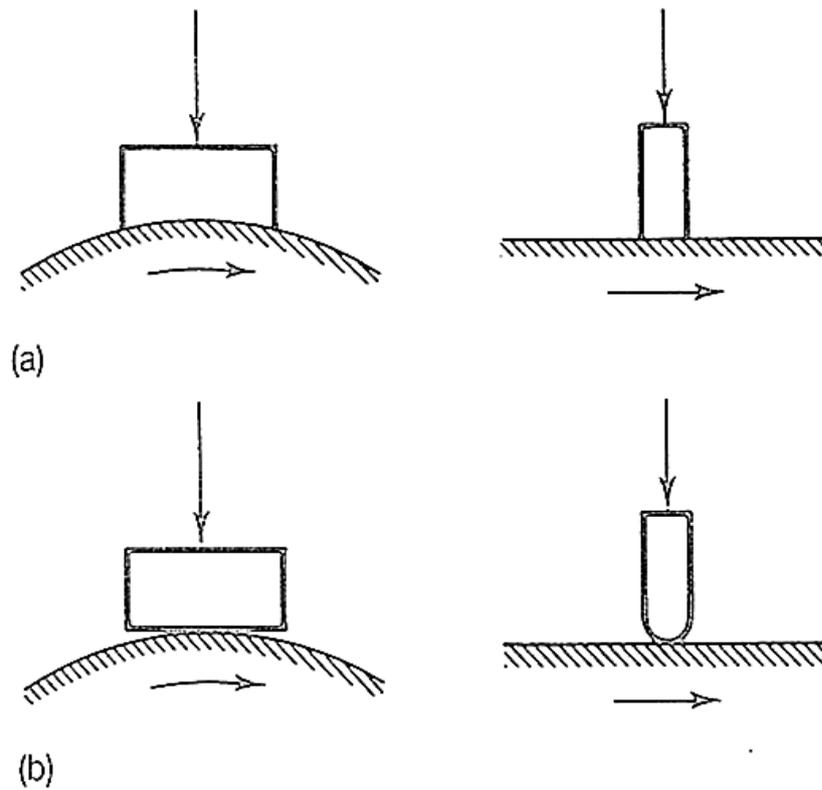


**Figura 1 – Geometria empregada no teste de desgaste por deslizamento.**

Fonte: HUTCHINGS, 1992, p.1.

Os arranjos simétricos não são muito utilizados para estudar o desgaste. Os exemplos são os dispositivos anelar (dois discos), com contato ao longo de uma linha (A na Fig.1) ou face a face (B na Fig.1). Se ambos os componentes forem girados, os dispositivos são simétricos.

Um pino pressionado contra um disco são os tipos de testes assimétricos mais comuns, seja ele na face plana (C) ou no aro (D), um bloco pressionado contra um anel (E) ou um pino no plano (F). Nesses casos, uma área de contato nominal estendida (por exemplo, um pino de ponta redonda em um disco) pode ser, inicialmente, inferior ao contato. Os detalhes desses tipos de contatos concentrados são mostrados na Fig. 2 (HUTCHINGS, 1992, p.5).



**Figura 2 – Contatos concentrados, conforme (a) e não conforme (b).**

Fonte: HUTCHINGS, 1992, p.1.

## 2.2 Inconel 625

A liga Inconel 625 faz parte da primeira geração das ligas de Níquel que através de solução sólida adicionando elementos como carbono, cromo, molibdênio e nióbio, aumentam a sua resistência. É bastante utilizada em revestimentos superficiais de componentes de equipamentos sujeitos à corrosão em meio aquoso salino, como é o caso dos componentes para extração de petróleo em alto-mar. É utilizada também em aplicações que requeiram boa combinação de resistência ao escoamento, à tração, à fluência, boa soldabilidade e boa resistência à corrosão quando submetida às altas temperaturas em ambientes agressivos. A temperatura de trabalho deste material varia desde valores negativos, para meios criogênicos, até 982°C (SPECIAL METALS, 2013, p.6.).

Devido à resistência à corrosão e excelente combinação de resistência mecânica em temperaturas ambiente e elevada, a liga Inconel 625 é encontrada em uma larga faixa de aplicações nas indústrias petroquímicas, química, nuclear e aeroespacial (THOMAS e col., 1994, p.7.).

Nesta liga, o Nióbio é responsável por promover endurecimento por solução sólida, que em conjunto com o molibdênio, proporcionam elevada resistência sem necessidade de tratamento térmico. Observa-se a ocorrência de precipitação de fases intermetálicas e carbonetos quando a liga é submetida a tratamentos térmicos de envelhecimento em temperaturas na faixa de 600 a 800° C, embora sua resistência mecânica seja alcançada pelo mecanismo de aumento de resistência por solução sólida. A precipitação dessas fases pode ter efeito maléfico ou benéfico para a liga, dependerá do tipo de fase, local de precipitação e propriedades requeridas (SHANKAR e col., 2001, p.8). Um diagrama de Tempo, Temperatura e Transformação (TTT), com as curvas de transformação de fases para o Inconel 625, pode ser observado na Fig. 3.

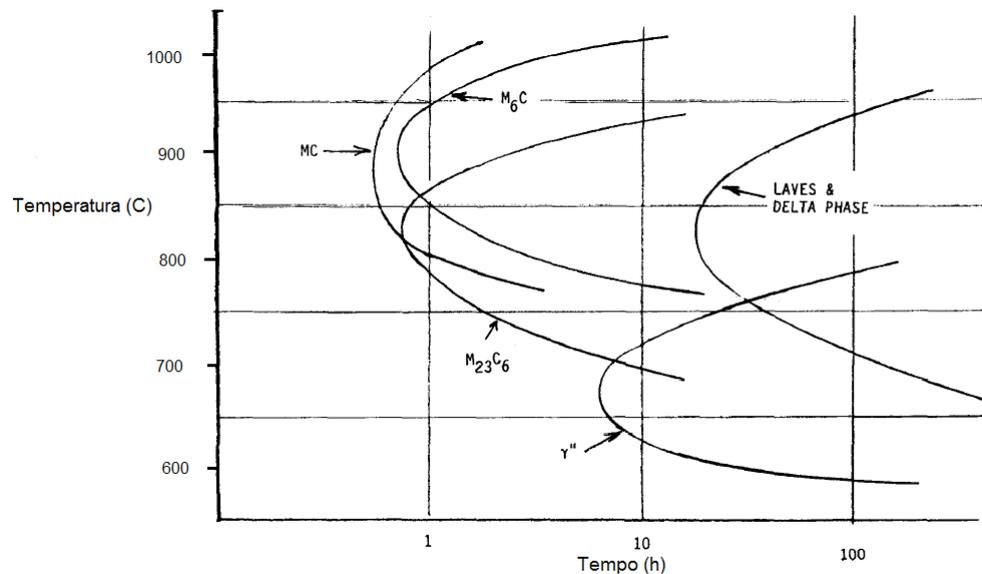


Figura 3- Diagrama TTT da liga 625.

Fonte: FLOREEN e col., 1994, p.2.

Na soldagem, devido a exposição às altas temperaturas, o Inconel 625 fica mais sensível às mudanças microestruturais. A curva de formação da fase delta para a liga soldada é deslocada para a esquerda por mais de uma ordem de magnitude de tempo (FLOREEN e col., 1994, p.9). O desenvolvimento da microestrutura desta liga está relacionado com a ocorrência de microsegregação de elementos de liga devido à redistribuição do soluto durante a solidificação. Assim, são formados determinados compostos no final da solidificação, quando um elemento em particular excedeu sua solubilidade durante o crescimento celular ou dendrítico, resultando na redução na resistência à corrosão da liga, carbonetos e fases intermetálicas podem se formar no estágio final de solidificação. A participação de fases no metal de solda é influenciada também pela participação do substrato na zona fundida (diluição) na soldagem dissimilar (OGBORN e col., 1995, p.10).

Ocorre a transformação (Líquido $\gg$ Fase Gama), na reação primária de solidificação para soldas com Inconel 625, no entanto, Mo e Nb segregam para o líquido e ao final da solidificação as reações se completam em duas fases ricas em Nb (Líquido $\gg$ + NbC). Esta transformação ocorre a uma temperatura mais elevada, aproximadamente 1250°C, seguido por (Líquido $\gg$ +Laves), aproximadamente 1200°C. As composições químicas do revestimento e do substrato influenciam a reação que será favorecida. Teores mais elevados de carbono favorece a formação de carbonetos primários, já o silício leva à formação preferencial da fase Laves (DUPONT e col., 2003, p.11).

Trabalhos anteriores mostraram que a resposta desse material ao desgaste é complexa e parâmetros como composição química e de deposição podem afetar muito os resultados (SANTOS, 2018, p.12). Nesse trabalho será investigado sistematicamente o efeito dos parâmetros do coeficiente de atrito e a taxa de desgaste na resposta ao deslizamento. Nosso foco é representar o desgaste que ocorre em equipamentos empregados nas unidades de destilação e de processamento do petróleo, onde, além de ter um ambiente corrosivo, possui o deslizamento de materiais sobre superfícies. Nesse caso, a utilização da configuração de teste com movimento alternado é fundamental para a representação do sistema.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA

Este capítulo aborda os detalhes dos materiais utilizados e os processos experimentais envolvidos na preparação das amostras e na execução dos ensaios.

#### 3.1. Amostras

Foram feitos ensaios utilizando esferas de aço 52100 de 10 mm de diâmetro como contra corpo em contato com três amostras de aço A36, revestidas com três materiais diferentes pelo processo MIG/MAG. O formato final das amostras foram blocos com as dimensões 70 x 40 x 5 mm. Os parâmetros variados no processo de deposição foram: 1 - gases de proteção; 2 - metais de adição; 3 - corrente; 4 - tensão; 5 - velocidade de alimentação; 6 - velocidade de soldagem, como se segue:

#### Amostra A

Foi utilizado o gás de proteção Ar+25% He e foi feita uma camada com o metal de adição aço inoxidável 316 que possui a composição química apresentada na Tab. 2.

**Tabela 2- Composição química do aço inoxidável 316.**

ABNT/SAE/AISI	C máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Si máx.	Ni	Cr	Mo
316	0,08	2,00	0,045	0,030	0,75	10,00- 14,00	16,00- 18,00	2,00- 3,00

Fonte: <http://www.favorit.com.br/produtos/acos-inoxidaveis/aco-aisi-316-aisi-316-l> - Fabricante: Favorit

Os parâmetros de soldagem são apresentados na Tab. 3.

**Tabela 3- Parâmetros de soldagem da amostra A.**

$U_M$ [V]	$V_{alim}$ [m/min]	$V_{SOLD}$ [cm/min]	$I_M$ [A]
25	6,5	25	150

Fonte: Edição do autor, 2018.

**Amostra I**

Foi utilizado o gás de proteção Ar+25%CO<sub>2</sub> e foi feita uma camada com o metal de adição ERNiCrMo-3 (Inconel 625). Os parâmetros de soldagem são mostrados na tabela 4.

**Tabela 4- Parâmetros de soldagem da amostra I.**

$U_M$ [V]	$V_{alim}$ [m/min]	$V_{SOLD}$ [cm/min]	$I_M$ [A]
25	12,5	25	150

Fonte: Edição do autor, 2018.

**Amostra M**

Foram feitas duas camadas, onde na primeira foi utilizado o gás de proteção Ar+25%He e o metal de adição aço inoxidável 316. Na segunda camada, foi utilizado o gás Ar+25%CO<sub>2</sub> e o metal de adição ERNiCrMo-3 (Inconel 625). Os parâmetros de soldagem são:

**Tabela 5- Parâmetros de soldagem da amostra M.**

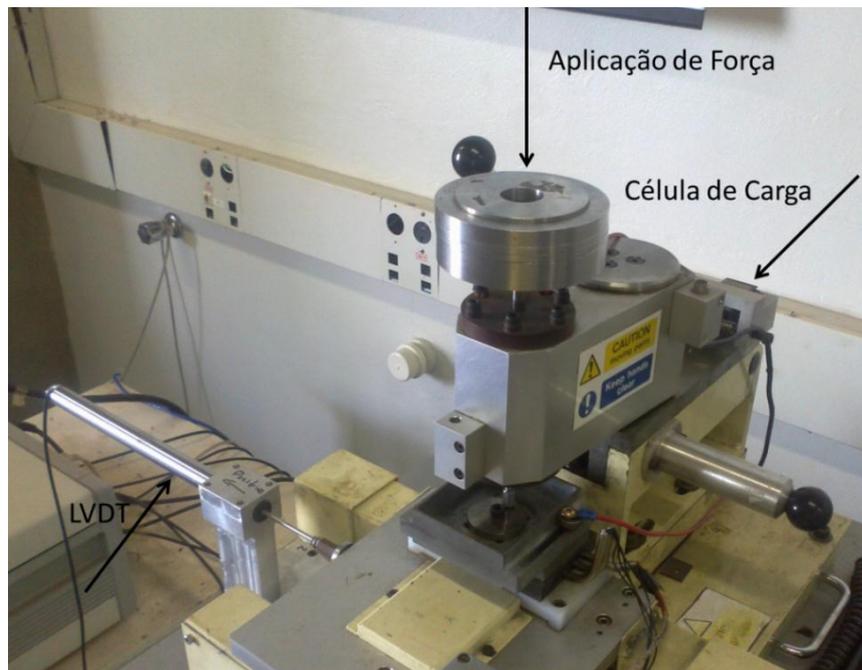
Camada	$U_M$ [V]	$V_{alim}$ [m/min]	$V_{SOLD}$ [cm/min]	$I_M$ [A]
Primeira	25	6,5	25	150
Segunda	25	12,5	25	150

Fonte: Edição do autor, 2018.

### 3.2. Equipamentos

Para a realização dos ensaios foi utilizado o Tribômetro Universal Plint<sup>®</sup> (modelo TE 67 Plint and Partners LDT), que fica no Laboratório de Tribologia e Materiais da UFU. O tribômetro permite fazer ensaios de desgaste por deslizamento entre duas ou mais superfícies de diversas geometrias, com adição de carga, variando os testes alternativos com uma amplitude de 10 mm e uma frequência de 2 Hz. Possui uma célula de carga para a medição de força de atrito, um sensor LVDT, que possibilita a medição da posição do corpo em relação ao contra corpo em cada ciclo do movimento alternado durante o ensaio e um sistema de medição do potencial do contato, possibilitando a percepção da formação ou não de uma camada isolante entre o corpo e o contra corpo durante o ensaio. A Fig. 4 exibe a disposição das partes do tribômetro.

O tribômetro também possui uma placa de aquisição, que é ligada a um microcomputador com o software LabVIEW, para se obter a aquisição de dados. No microcomputador foi implementado um programa para adquirir os sinais da célula de carga, do LVDT e também do potencial de contato.



**Figura 4- Ilustração do Tribômetro Plint TE67 utilizado nos ensaios.**

Fonte: JÚNIOR, 2013, p.3.

A análise dos dados foi feita utilizando-se uma técnica denominada triboscopia, que produz imagens numéricas de sinais adquiridos durante o ensaio, possibilitando obter uma representação bidimensional ou tridimensional da variação dos parâmetros físicos em relação ao tempo durante o ensaio de desgaste. Utilizou-se um algoritmo no programa MATLAB para a confecção das imagens triboscópicas (JÚNIOR, 2013, p.1). Os gráficos em 2D (coeficiente de atrito médio x ciclos) e 3D (coeficiente de atrito médio x ciclos x posição sobre a amostra) que serão discutidos nesse presente trabalho foram gerados através da triboscopia.

### 3.3. Ensaios

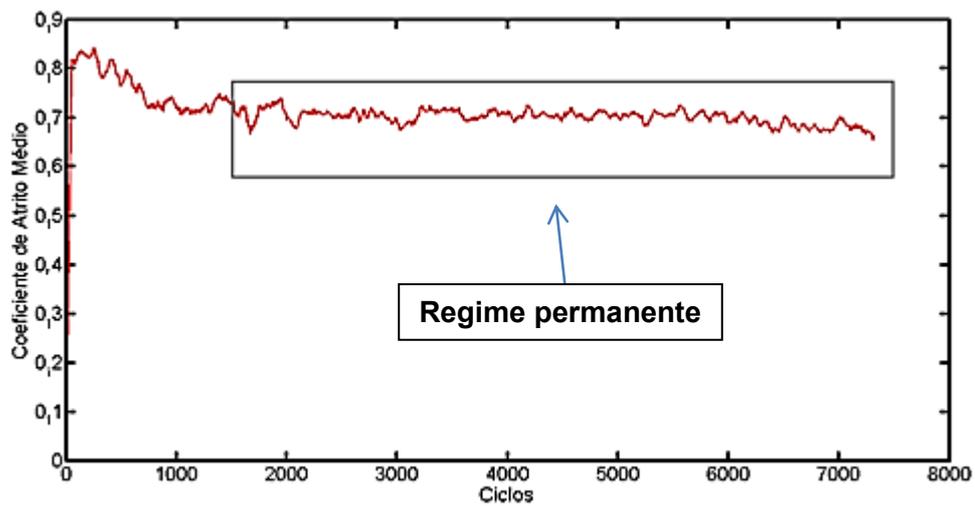
Primeiramente, as amostras e as esferas foram limpas com álcool e polidas. Logo após, foram realizados testes de deslizamento alternado entre a superfície das amostras (superfície plana) e o contra corpo esférico. Foram realizados três ensaios para cada amostra e gerados gráficos para discussão. A Tab. 5 mostra os parâmetros utilizados nos ensaios.

**Tabela 6- Parâmetros utilizados nos ensaios.**

Carga normal	21,5 N
Frequência	2 Hz
Amplitude	10 mm
Tempo	30 minutos
Diâmetro da esfera	10 mm

Fonte: Edição do autor, 2018.

Foi adotado o regime permante a partir da estabilidade do coeficiente de atrito, como exemplificado na Fig. 5, onde o regime permanente começa a partir de aproximadamente 1500 ciclos.



**Figura 5- Gráfico que mostra o momento onde é definido o regime permanente.**

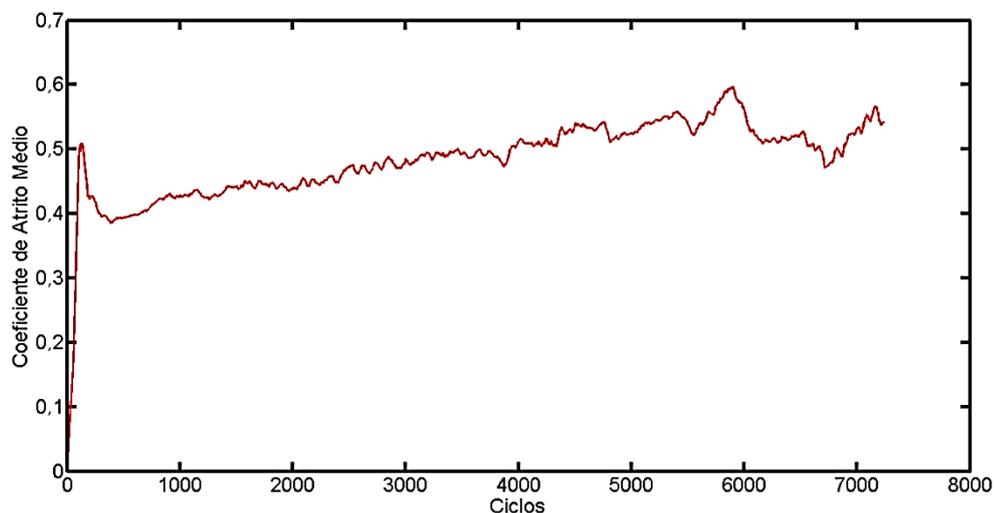
Fonte: Edição do autor, 2018.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, os gráficos em 2D e 3D que relacionam o coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Os gráficos apresentam o coeficiente de atrito médio dos três ensaios realizados.

A figura 6 apresenta o resultado para a Amostra A.

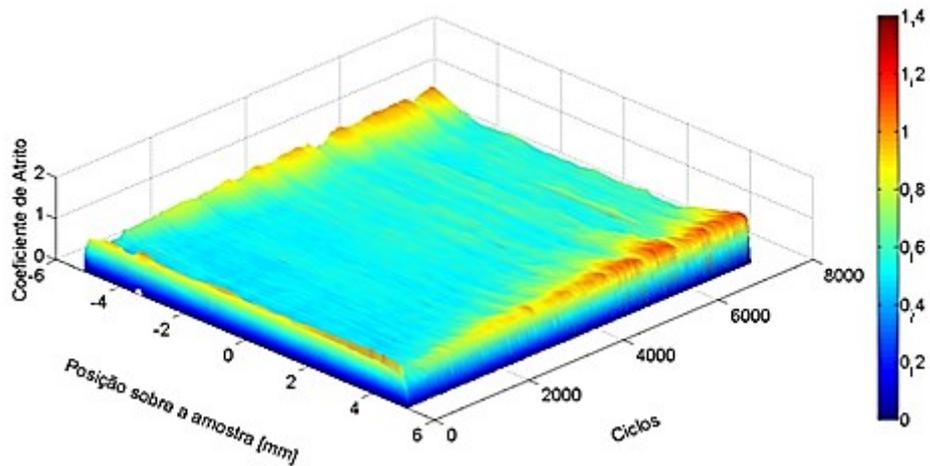


**Figura 6- Gráfico do coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos na amostra A (Aço A36 revestido com uma camada de aço inoxidável 316**

Fonte: Edição do autor, 2018.

A Fig. 6 mostra que o coeficiente de atrito cresce inicialmente até aproximadamente 0,50 rompendo as camadas superficiais e formando óxidos, depois esses óxidos formam uma tribocamada mais adesiva e o coeficiente decresce até 0,4. Em seguida, essa tribocamada é removida e o coeficiente de atrito aumenta lentamente até atingir uma interface estável, apresentando um comportamento aproximadamente constante em torno de 0,5. Considerando o regime permanente do ensaio como definido no capítulo 3 (Figura 5), foi calculado o coeficiente de atrito médio de 0,523 que representa esse sistema.

A Fig. 7 apresenta o valor do coeficiente de atrito de acordo com a posição da esfera sobre a amostra e o número de ciclos. Esse tipo de gráfico é conhecido como triboscopia.

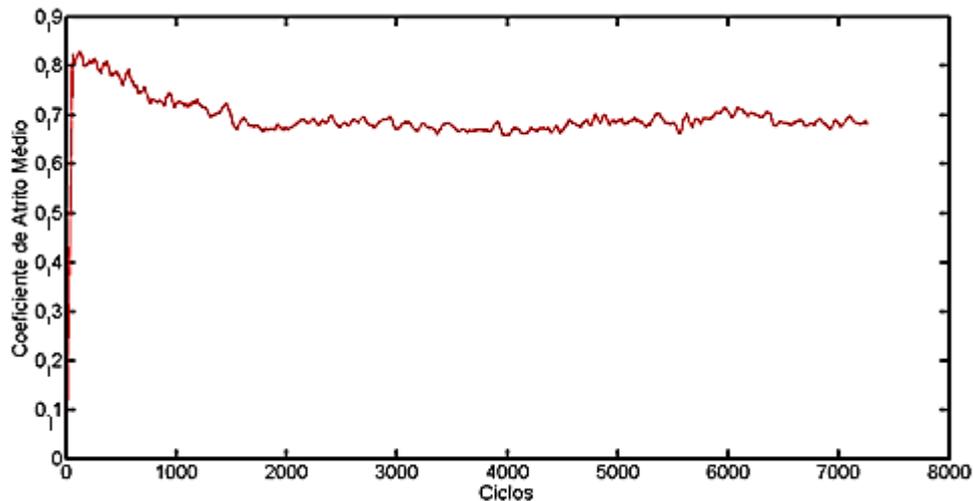


**Figura 7- Gráfico em 3D que mostra a reação de coeficiente de atrito, posição da esfera sobre a amostra A e o número de ciclos.**

Fonte: Edição do autor, 2018.

O mapa triboscópico da Fig. 7 mostra que, diferentemente da figura 6, o coeficiente de atrito pode aumentar localmente até valores acima de 1,2. Esse aumento está posicionado próximo da região de ponto morto do movimento alternado. Esse aumento local pode estar associado a menor velocidade do contato tribológico nessa região. Baixas velocidades não favorecem a formação de óxido que pode implicar em maior adesão entre copo e contra corpo. Adicionalmente, trabalhos anteriores mostram que existe a maior possibilidade de acúmulo de particulado nas bordas da trilha de desgaste (JÚNIOR, 2013, p.1). O aumento de partículas soltas nessa região está conectado com o aumento do coeficiente de atrito local. Assim como na Fig. 6, o mapa triboscópico mostra que o coeficiente de atrito aumenta lentamente do início até atingir o regime permanente em aproximadamente 4500 ciclos. Esse aumento no valor do coeficiente de atrito pode estar relacionado com a formação de uma tribocamada na interface. Em determinada região do mapa triboscópico essa tribocamada pode adotar uma resposta mais adesiva ou não, que se traduz em maior ou menor coeficiente de atrito respectivamente. Menores valores de coeficientes de atrito estão associados à maior quantidade de óxidos na interface. Nesse caso, pode haver o processo de formação e raspagem de óxidos que se desprendem da tribocamada e passam a atuar como partículas na interface (HUTCHINGS, 1992, p.5).

A Figura 8 apresenta a evolução do coeficiente de atrito observado na Amostra I.

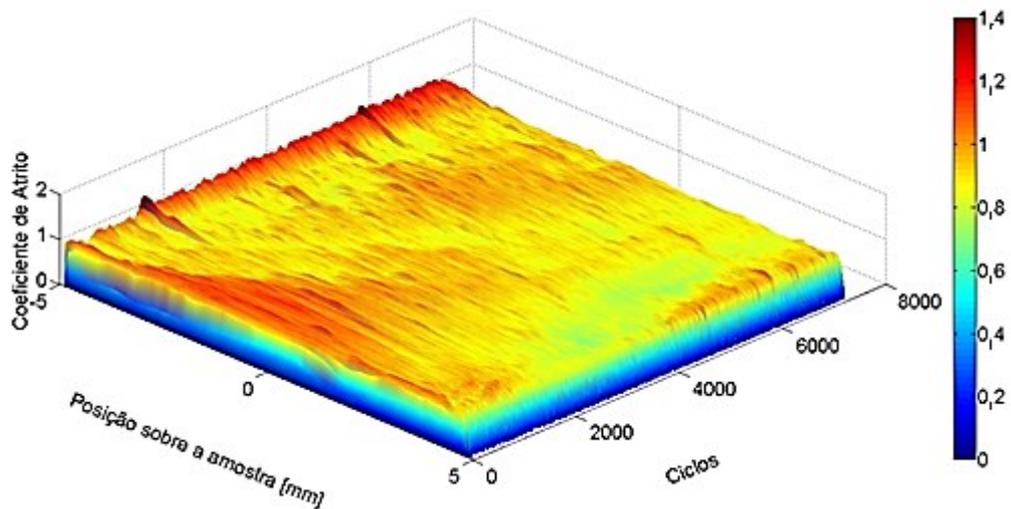


**Figura 8- Gráfico do coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos na amostra I (Aço A36 revestido com uma camada ERNiCrMo-3 Inconel 625)**

Fonte: Edição do Autor, 2018.

Nos momentos iniciais do ensaio a Fig. 8 apresenta que o coeficiente de atrito atinge um valor inicial de 0,8 diminuindo até aproximadamente 0,65, onde se manteve constante até o fim do ensaio. Observa-se que, para esse material, a formação de uma tribocamada estável levou a redução dos valores de coeficiente de atrito. Nesse caso, o coeficiente de atrito não variou tanto quanto no ensaio com a amostra A (Figs. 6 e 7). Esse fato pode estar associado a boa estabilidade da tribocamada que não apresentou destacamento e formação de partículas maiores na interface. De acordo com o critério de regime permanente, foi calculado um coeficiente de atrito médio de 0,644.

A Fig. 9 apresenta o mapa triboscópico do ensaio apresentado na figura 8.



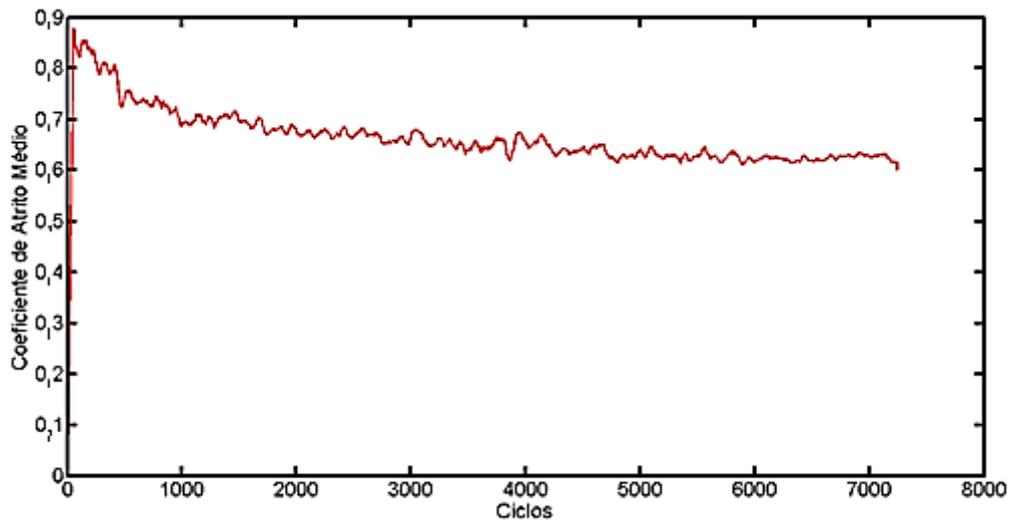
**Figura 9- Gráfico em 3D que mostra a relação de coeficiente de atrito, posição da esfera sobre a amostra I (Inconel 625) e o número de ciclos.**

Fonte: Edição do autor, 2018.

O mapa triboscópico apresentado na Fig. 9 também mostra regiões com variação de atrito que podem estar relacionadas a presença de tribocamada ora mais adesiva ora com mais óxidos. Da mesma forma que a amostra A, as laterais da marca de desgaste sempre apresentam um maior valor de coeficiente de atrito, associado às baixas velocidades nessa região de contato.

O maior valor de atrito médio observado para a amostra I em comparação com a amostra A é devido à natureza da tribocamada formada. Apesar das maiores irregularidades apresentadas no sistema tribológico com a amostra A, o atrito médio nesse caso é maior, indicando que na região central da marca de desgaste são formados óxidos mais efetivos na redução do atrito (veja Fig. 7). Esses mesmos óxidos podem participar do contato como partículas abrasivas caso se desprendam da tribocamada.

A figura 10 mostra o coeficiente de atrito adquirido nos ensaios usando a Amostra M.

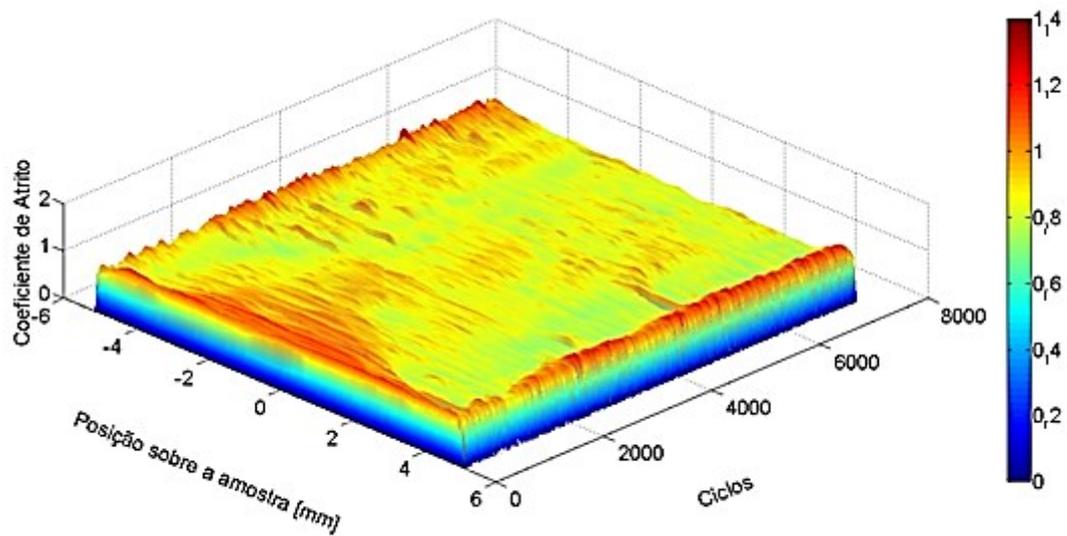


**Figura 10- Gráfica do coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos na amostra M (Aço A36 revestido com dupla camada aço inoxidável 316 + Inconel 625).**

Fonte: Edição do autor, 2018.

A Fig. 10 mostra que o coeficiente de atrito apresenta um valor inicial alto de aproximadamente 0,8 apresentando uma queda nesse valor até 0,65, onde se manteve constante até o fim do ensaio. O comportamento do coeficiente de atrito foi parecido com o da amostra anterior, indicando a prevalência do Inconel 625 na formação da tribocamada. Também não foram observadas as irregularidades observadas nos ensaios com a amostra A (inox 316). De acordo com o critério de regime permanente de ensaio, foi calculado um coeficiente de atrito de 0,656.

A Fig. 11 apresenta o mapa 3D do coeficiente de atrito em função da posição do contra corpo e do número de ciclos. O valor do coeficiente de atrito se mantém constante ao longo da marca de desgaste, apresentando um pequeno aumento nas laterais da marca, devido ao aumento da região de contato proporcionado pela diminuição da velocidade (ponto morto), mostrado também pela variação do coeficiente de atrito na Fig. 10, como já explicado nas amostras anteriores.

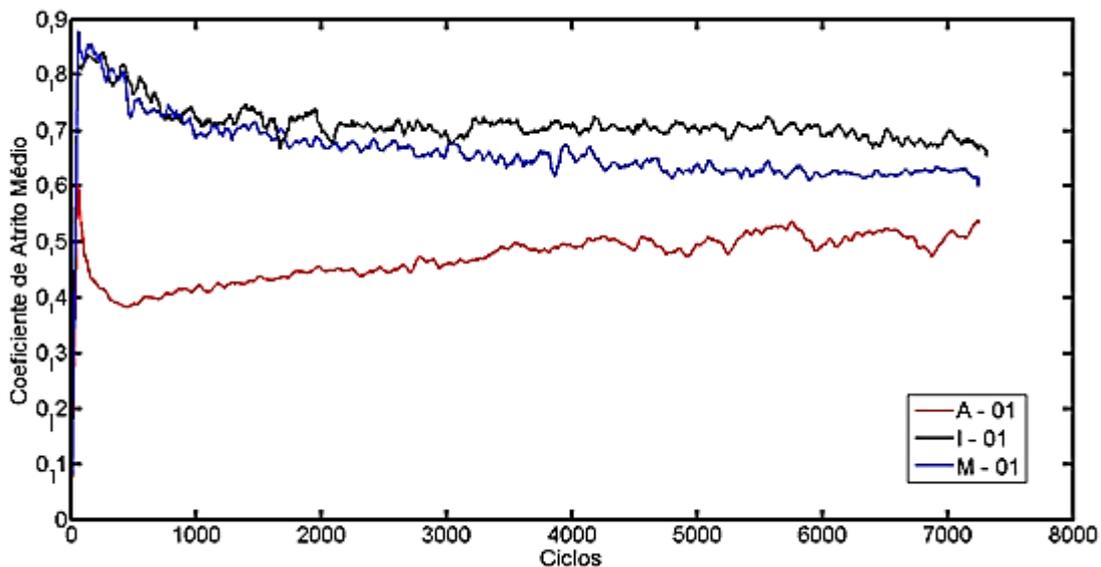


**Figura 11-** Gráfico em 3D que mostra a reação de coeficiente de atrito, posição da esfera sobre a amostra M e o número de ciclos.

Fonte: Edição do autor, 2018.

Assim como as amostras anteriores, as regiões com variação de atrito foram correlacionadas com a atuação da tribocamada na interface e com a formação de particulados. Maiores valores de coeficiente de atrito observados próximos ao ponto morto foram associados a menor energia de contato nessa região, como explicado anteriormente. O coeficiente de atrito médio foi um pouco menor do que o observado para a amostra M.

A Fig. 12 apresenta a comparação entre os gráficos de coeficiente de atrito médio para as três amostras.

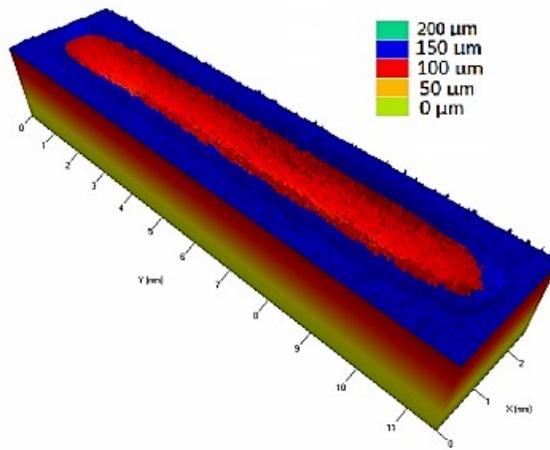


**Figura 12- Gráfico comparativo de coeficiente de atrito médio das três amostras.**

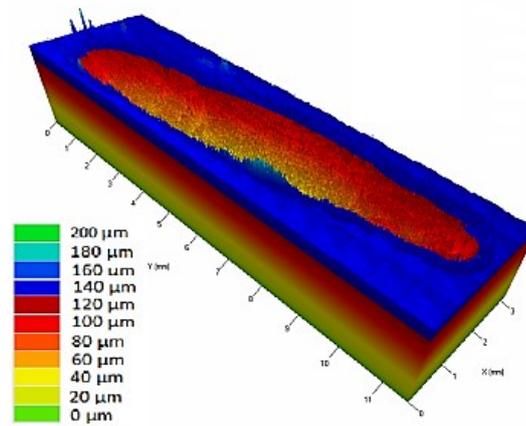
Fonte: Edição do autor, 2018.

Como observado na Fig.12, os coeficientes de atrito para as amostras I e M apresentaram maiores valores do que o coeficiente da amostra A. Como já explicado anteriormente, esse fato está relacionado com a natureza da tribocamada formada que, para o aço inoxidável 316 gerou óxidos com menor coeficiente de atrito em comparação com a camada formada nas amostras I e M. No caso do revestimento duplex da amostra M, o revestimento mais próximo da superfície é o Inconel 625 o que justifica o comportamento tão próximo da amostra I, dado a natureza da tribocamada formada.

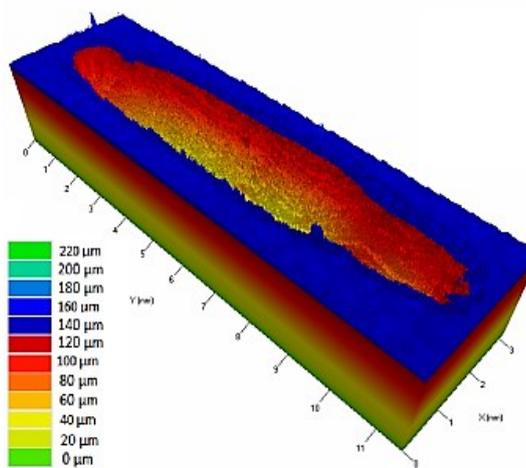
Através da análise da topografia das marcas de desgaste obtidas através da técnica microscopia confocal, observa-se que as amostras com 2 camadas de revestimento (amostra M) apresentaram um valor de taxa de desgaste maior em comparação com a amostra com somente um revestimento de aço inoxidável (amostra I), que possui uma taxa de desgaste superior que a amostra com revestimento apenas de Inconel. (Figs. 13 e 14). De acordo com a equação de Arhard (HUTCHINGS, 1992, p.5) para desgaste por deslizamento, a taxa de desgaste é inversamente proporcional à dureza, ou seja, quanto mais duro for o material, menor será sua taxa de desgaste. Nesse caso a maior dureza do Inconel 625 se reflete na maior resistência ao desgaste quando comparados às amostras A e M (Fig. 14).



(a)



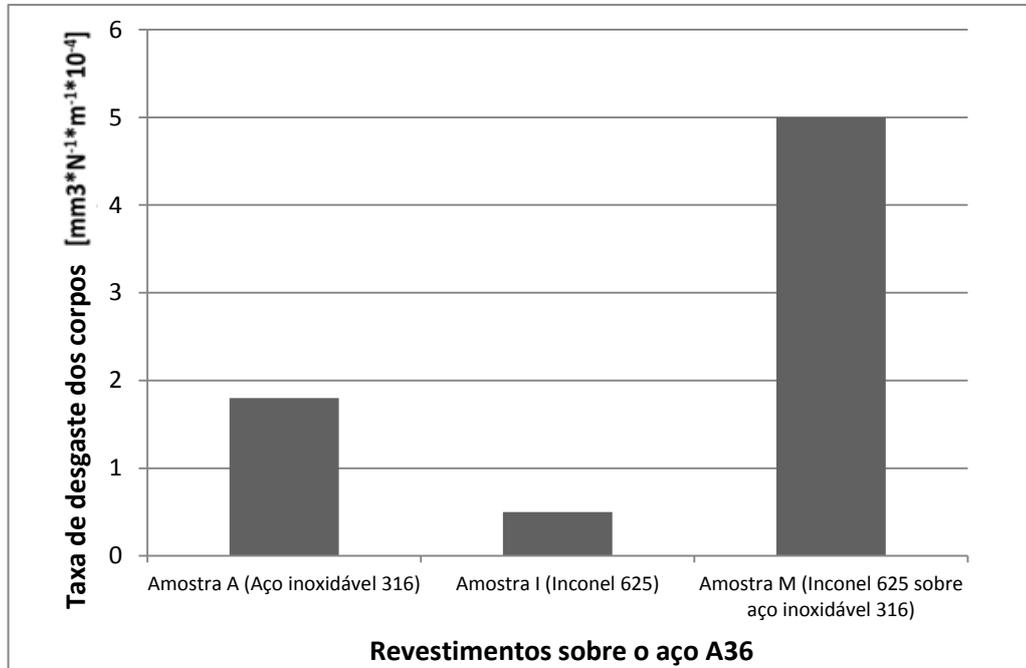
(b)



(c)

Figura 13- Imagens confocais de amostras (a) A, (b) I, (c) M.

A medição do volume desgastado em cada marca de desgaste foi realizada diretamente na topografia apresentada na Figura 13 usando o software próprio do microscópio confocal (Figura 14).

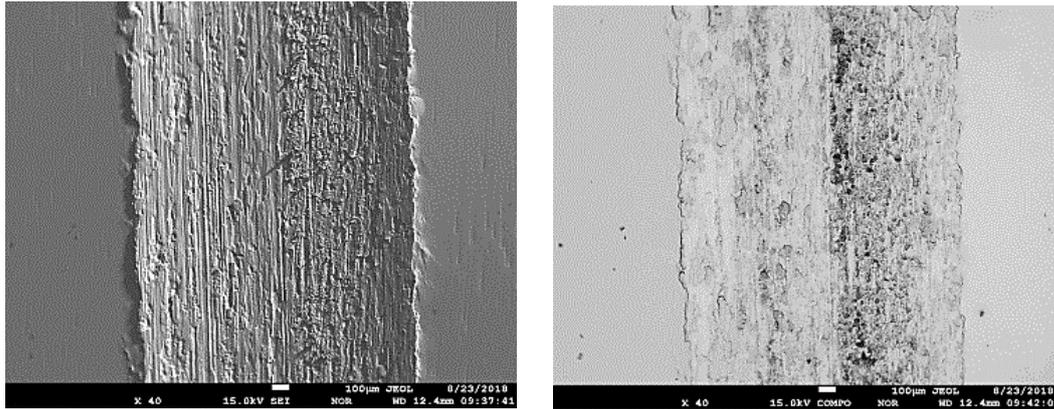


**Figura 14- Taxa de desgaste das amostras após 30 min de deslizamento**

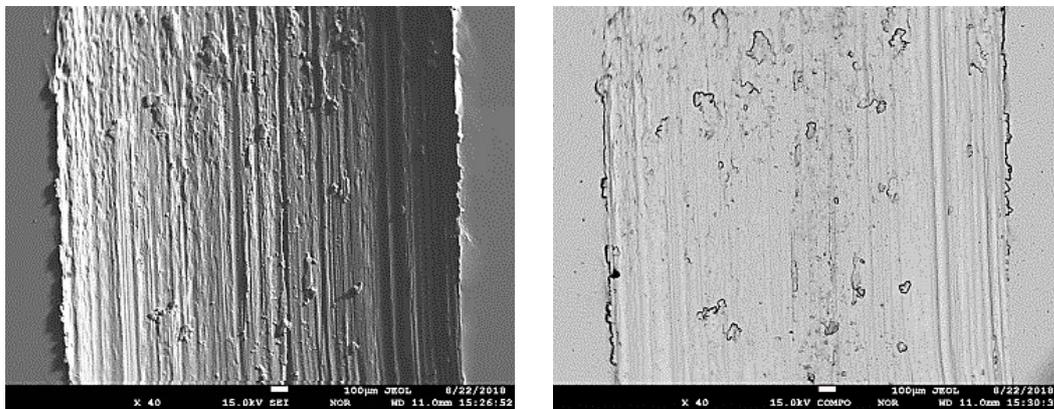
Fonte: FILHO e col., 2018, p.4.

Os resultados mostram que o revestimento de Inconel 625 é mais resistente do que o aço inoxidável nas condições testadas. Apesar do maior coeficiente de atrito, a maior resistência mecânica do Inconel 625 ofereceu melhor suporte para a tribocamada formada nos ensaios referentes a amostra I. Por outro lado, o revestimento duplex com o aço inox abaixo do Inconel provavelmente não ofereceu a resistência mecânica necessária para a tribocamada formada levando a maiores valores de taxa de desgaste.

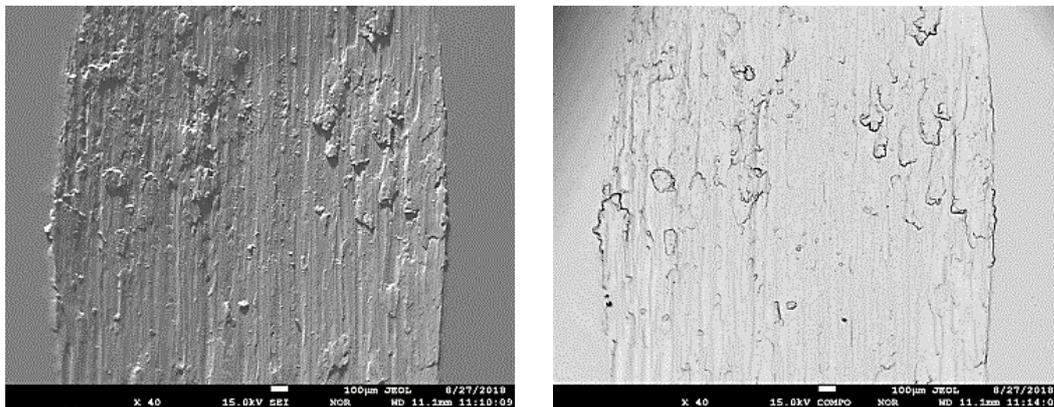
As Imagens de microscopia eletrônica de varredura BSE da amostra revestida de Inconel 625 (Fig. 15) sugerem a formação de uma tribocamada que protege a marca de desgaste. Nessas imagens as marcas mais escuras se referem à presença de elementos leves, tais como óxidos ou carbonetos que protegem a superfície durante o processo de desgaste por deslizamento (FILHO e col., 2018, p.13.).



(a)



(b)



(c)

**Figura 15 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura BSE das amostras revestidas (a) A, (b) I, (c) M.**

Fonte: FILHO e col., 2018, p.4.

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSÕES**

Os resultados apresentados mostram que o revestimento de Inconel 625 se apresenta como uma boa opção para ser usado em ambientes que sofrem com o desgaste por deslizamento. Outro ponto importante, não abordado nesse trabalho, é a resistência à corrosão desse material. Atualmente, diversos ramos industriais e de tecnologia necessitam de materiais que resistem a diversos tipos de desgaste, pois assim reduzem os custos com manutenção.

Nas condições testadas o revestimento de Aço inoxidável 316 apresentou um menor coeficiente de atrito e maior taxa de desgaste. A baixa resistência ao desgaste foi relacionada com a menor resistência mecânica desse material quando comparado com o Inconel 625.

O Inconel 625 pode ser utilizado em inúmeras situações práticas da Engenharia Mecânica com ganhos evidentes na resistência ao desgaste e corrosão, o que implica na otimização de processos.

## **CAPÍTULO VI**

### **TRABALHOS FUTUROS**

Possíveis trabalhos futuros podem utilizar esses revestimentos para observar o efeito do potencial de contato dos ensaios de desgaste por deslizamento do Inconel 625, relacionando-o com o coeficiente de atrito, além de estudar sobre o efeito dos debrís formados durante o desgaste.

Outro tema do estudo pertinente trata da tribocorrosão desses revestimentos nesse tipo de ensaio, ou seja, a combinação entre desgaste por deslizamento e corrosão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Textos:

SANTOS, R.P.G., **Microabrasão Corrosão de Revestimentos de Inconel 625 depositados por Plasma Pó (PTAP)**. Uberlândia. 2018. 178 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.774>.

ERDEMIR, A.; MARTIN, J.-M. Introduction. In: ALI, E. e JEAN-MICHEL, M. (Ed.). **Superlubricity**. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2007.p.xvii-xix. ISBN 978-0-444-52772-1.

FARIAS, M. C. M., MARU, M. M., SANTOS, J. F. dos, PAOVESE, L. R.. **Estudo da força de atrito dinâmica em ensaio de desgaste por deslizamento a seco**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo, SP, Brasil.

FERREIRA FILHO, Da., SOUZA, D., OLIVEIRA JUNIOR, M.M. de, GONÇALVES Jr, J.L., SILVA JUNIOR, W.M. da. **Evaluation of the tribological behavior of Inconel 625 cladding**. School of Electrical, Mechanical and Computer Engineering, Federal University of Goias, Goiania, 74605-010, Brazil

FLOREEN, S.; FUCHS, G. E.; YANG, W. J. The Metallurgy of Alloy 625. **The Minerals, Metals & Materials Society, E.A. Loria**, New York, 1994.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. CRC Press, 1992.

KUMAR, V.K.; SWARNAMANI, S., 1997. **Vibration monitoring in sliding wear of plasma sprayed ceramics**. Wear, Vol. 210, Elsevier Science, pp. 255-262.

OGBORN, J. S.; OLSON, D. L.; CIESLAK, M. J. **Influence of solidification on the microstructural evolution of nickel base weld metal**. Materials Science and Engineering, 1995.

OLIVEIRA JÚNIOR, Mário Martins de. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. **Lubrificação sólida em meio fluido**. 2013. 95 f. Dissertação de Mestrado.

SHANKAR, V.; RAO, K. B. S.; MANNAN, S. L. **Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 625 Superalloy**. Journal of Nuclear Materials, 2001.

THOMAS, C.; TAIL, P. **The Performance of Alloy 625 in Long-Term Intermediate Temperature Applications**, 1994.

**Endereços eletrônicos:**

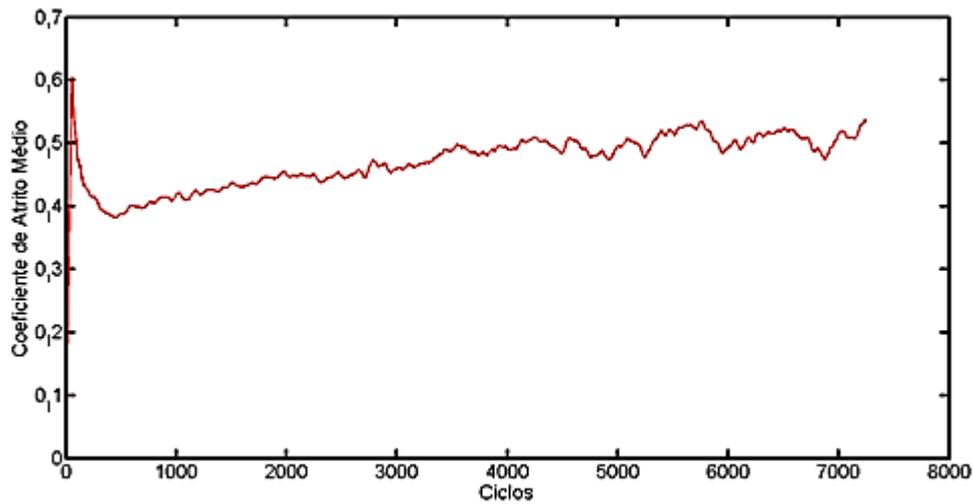
Autor desconhecido. **Inconel**. Disponível em: <http://www.realum.com.br/inconel2.php>  
Acesso em: 05 set. 2018.

SPECIAL, M. **Technical Bulletin INCONEL Alloy 625**. 2013. Disponível em:  
<http://www.specialmetals.com/documents/inconel%20alloy%20625.pdf>. Acesso em: 22 set. 2018.

## ANEXO I

### Amostra A

Nos gráficos abaixo é mostrado os coeficientes de atrito em 2D e 3D gerados a partir dos outros dois ensaios feitos para minimizar o erro dos resultados da amostra A. Na figura 15, o coeficiente médio total foi de 0,5035 e na 17 o coeficiente médio total foi de 0,5532. Na Fig. 16 e Fig. 18, que relacionam o coeficiente de atrito com a posição sobre a amostra e o número de ciclos percebe-se o que o coeficiente de atrito aumenta nas laterais da amostra, como já citado no trabalho.



**Figura 16- Gráfico do segundo ensaio da amostra A que relaciona o coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos da amostra.**

Fonte: Edição do autor, 2018.

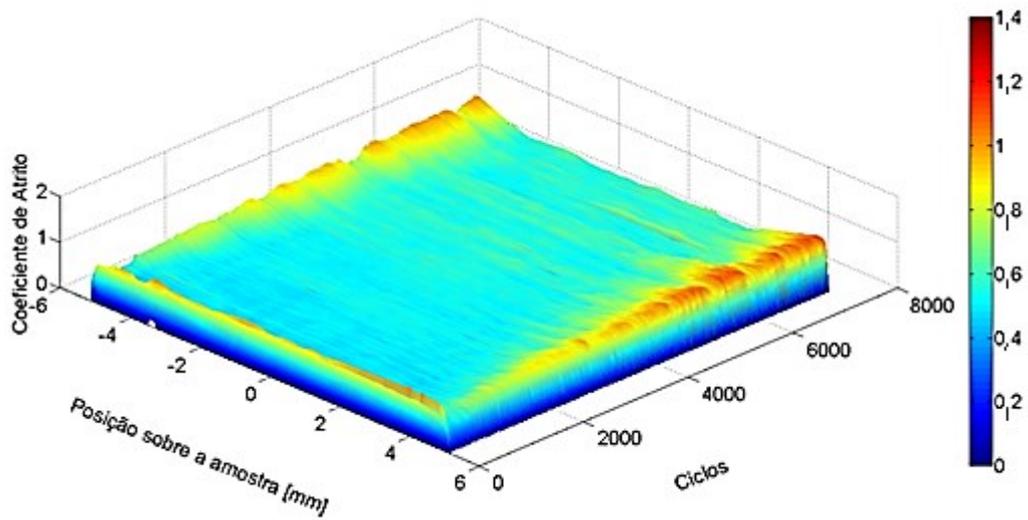


Figura 17- Gráfico em 3D do segundo ensaio da amostra A que relaciona o coeficiente de atrito com o número de ciclos e com a posição da esfera sobre a amostra A.

Fonte: Edição do autor, 2018.

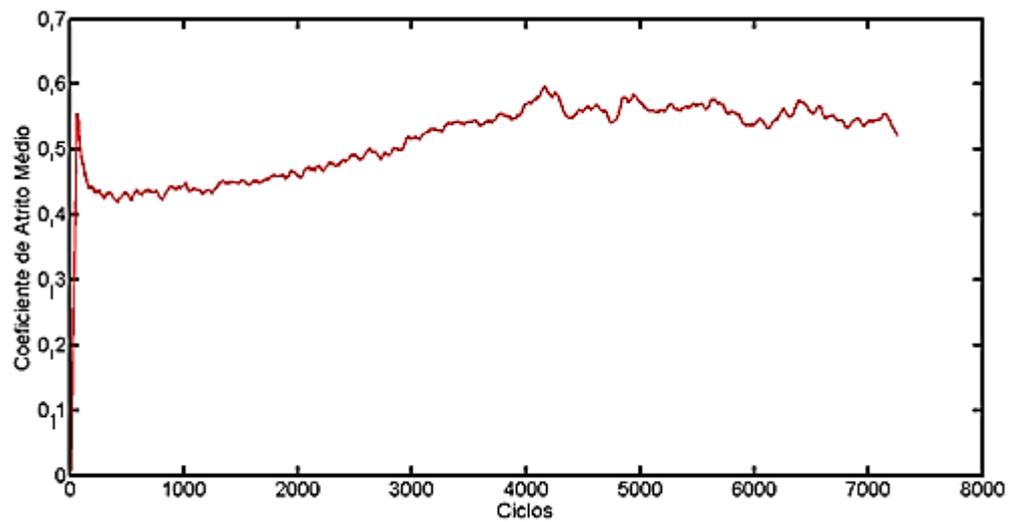
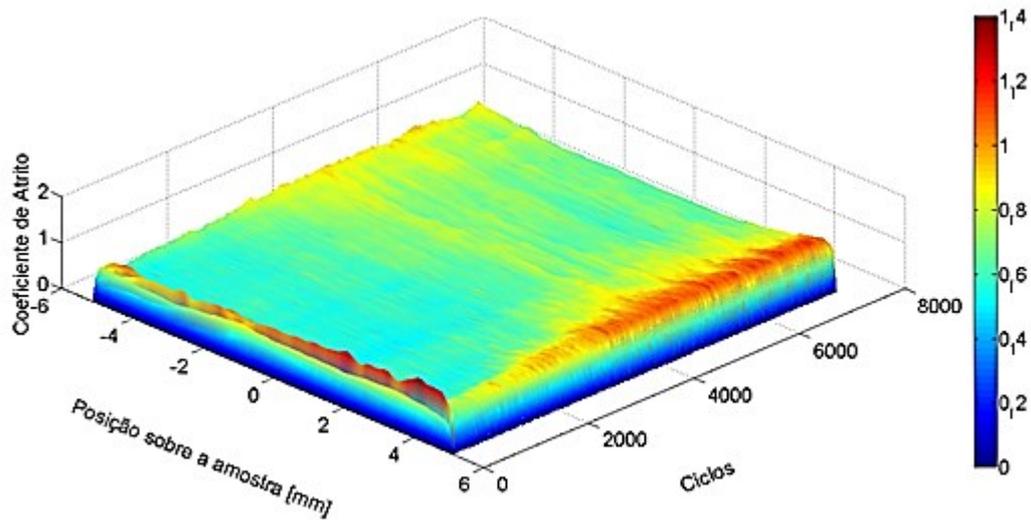


Figura 18- Gráfico do terceiro ensaio da amostra A que relaciona o coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos da amostra.

Fonte: Edição do autor, 2018.



**Figura 19-** Gráfico em 3D do terceiro ensaio da amostra A que relaciona o coeficiente de atrito com o número de ciclos e com a posição da esfera sobre a amostra.

Fonte: Edição do autor, 2018.

## Amostra I

Abaixo, os outros gráficos de coeficiente de atrito em 2D e 3D gerados a partir dos outros dois ensaios feitos para minimizar o erro dos resultados na amostra I. O coeficiente médio total foi de 0,6613 mostrado na figura 19 e 0,6342 na 21. Na Fig. 20 e Fig. 22, que mostram os gráficos de coeficiente de atrito x posição sobre a amostra x ciclos, percebe que o coeficiente de atrito aumenta nas laterais da amostra, como já citado no trabalho.

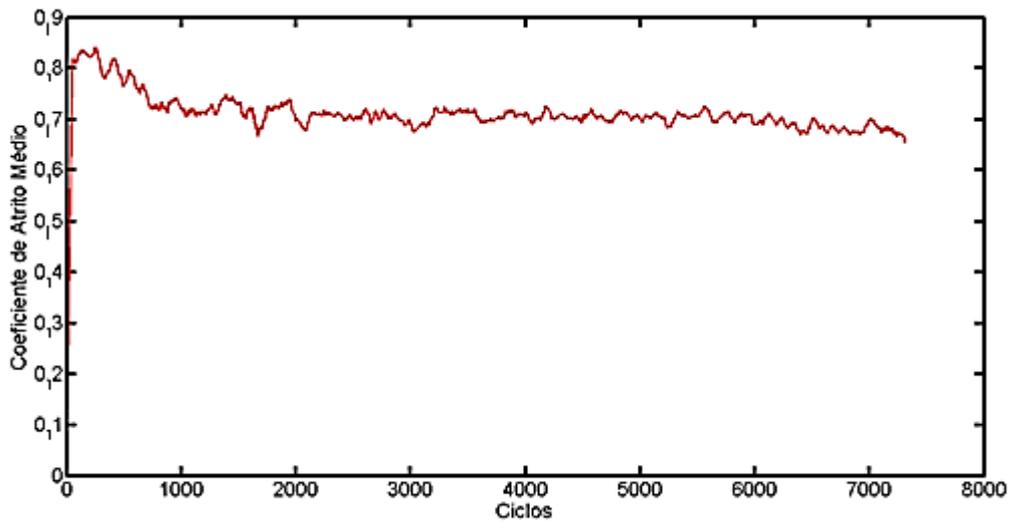


Figura 20- Gráfico do segundo ensaio da amostra I que relaciona o coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos da amostra.

Fonte: Edição do autor, 2018.

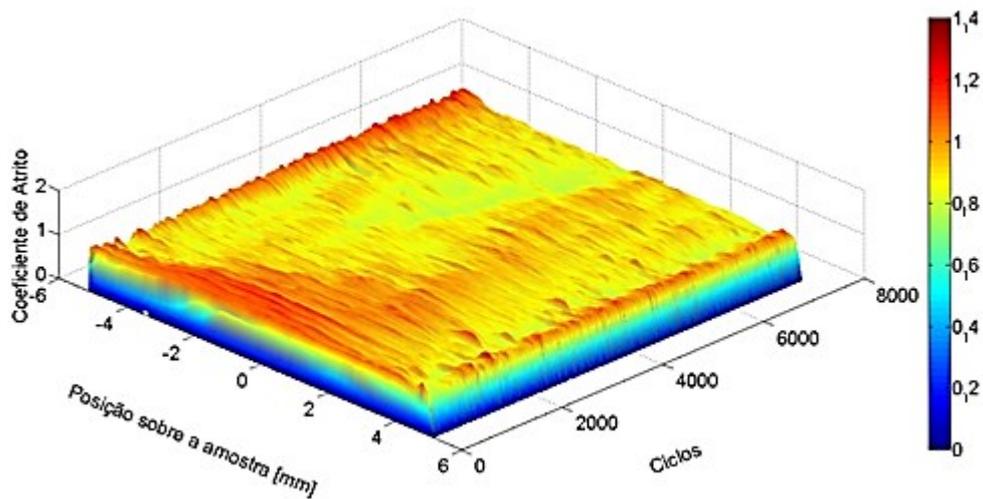
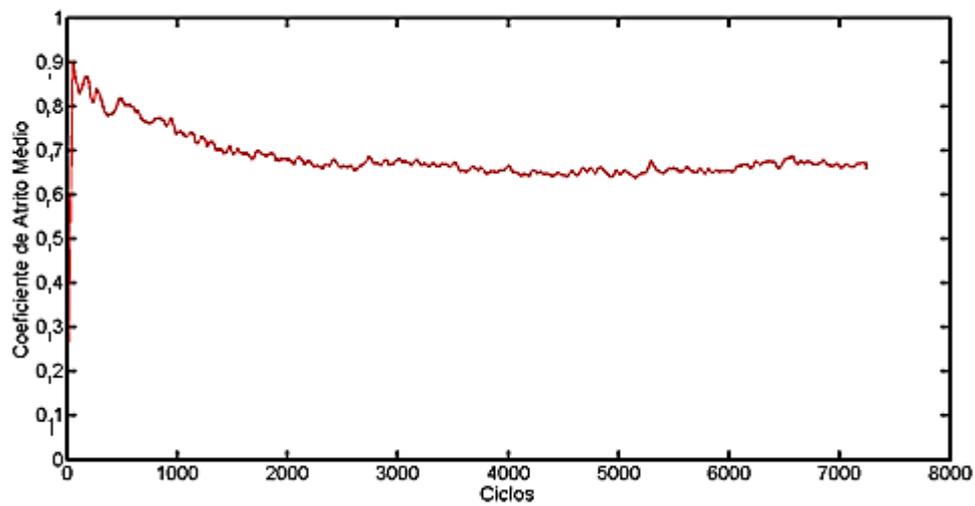


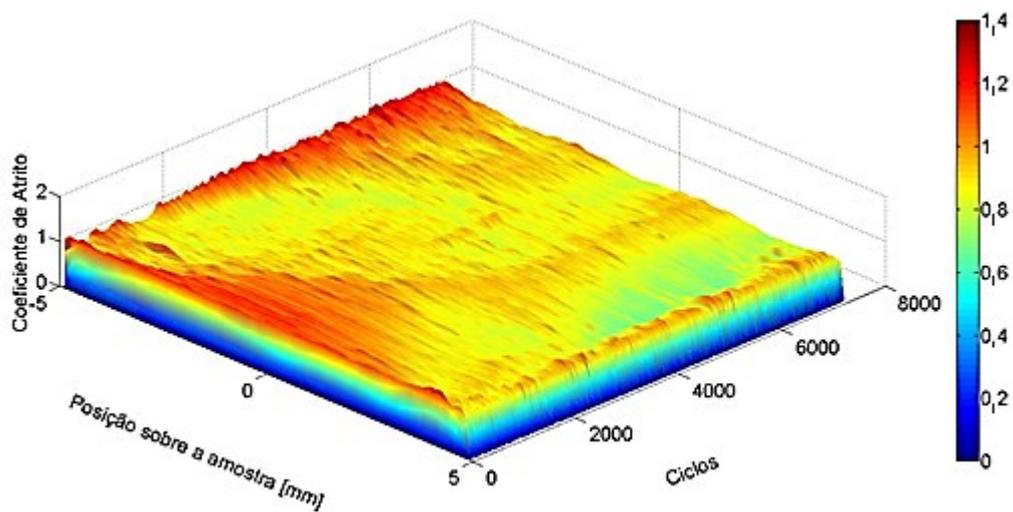
Figura 21- Gráfico em 3D do segundo ensaio da amostra I que relaciona o coeficiente de atrito com o número de ciclos e com a posição da esfera sobre a amostra.

Fonte: Edição do autor, 2018.



**Figura 22-** Gráfico do terceiro ensaio da amostra I que relaciona o coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos da amostra.

Fonte: Edição do autor, 2018.

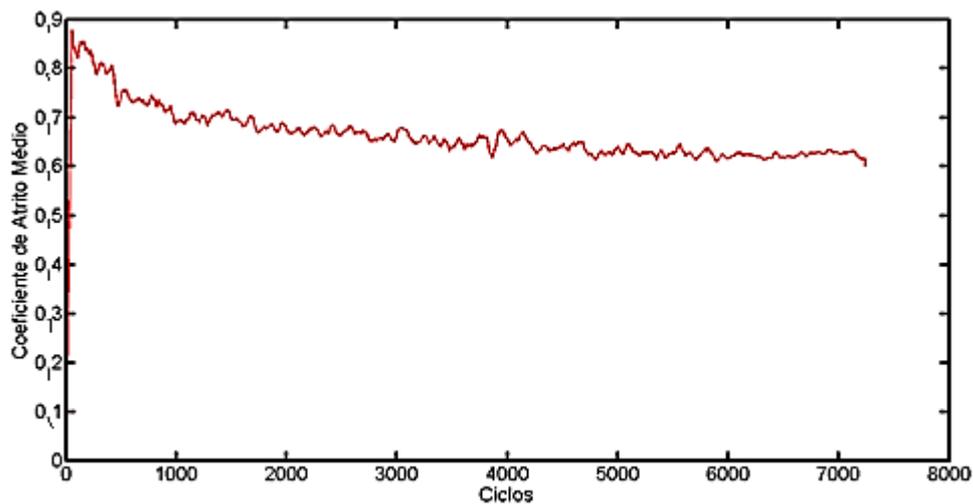


**Figura 23-** Gráfico em 3D do terceiro ensaio da amostra I que relaciona o coeficiente de atrito com o número de ciclos e com a posição da esfera sobre a amostra.

Fonte: Edição do autor, 2018.

## Amostra M

A partir dos outros dois ensaios feitos com a amostra M foram gerados os gráficos representados nas figuras abaixo de coeficiente de atrito em 2D e 3D. Na Fig. 23, o coeficiente médio total foi de 0,6166 e de 0,6618 na figura 25. A Fig. 24 e Fig. 26, que mostram os gráficos de coeficiente de atrito x posição sobre a amostra x ciclos exibem que o coeficiente de atrito aumenta nas laterais da amostra, como já citado no trabalho.



**Figura 24-** Gráfico do segundo ensaio da amostra M que relaciona o coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos da amostra.

Fonte: Edição do autor, 2018.

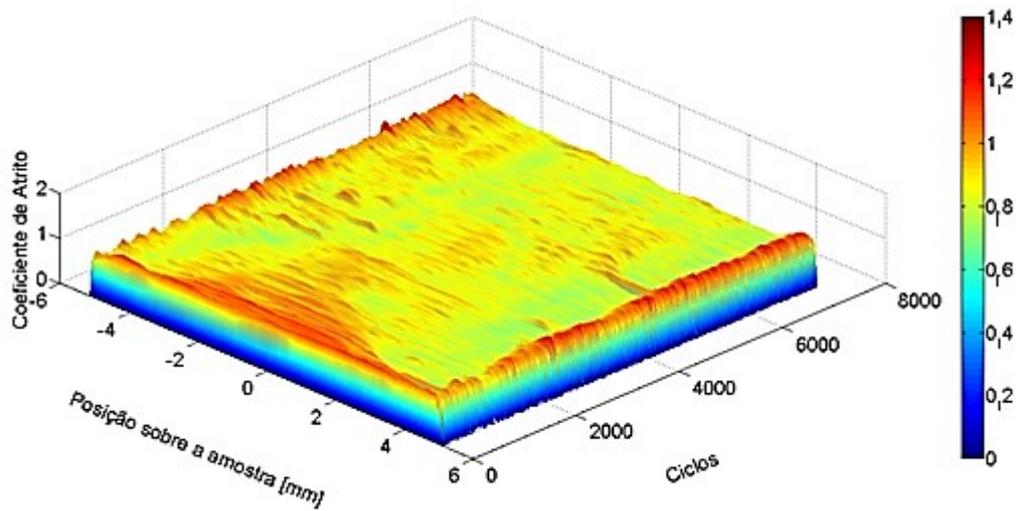


Figura 25- Gráfico em 3D do segundo ensaio da amostra M que relaciona o coeficiente de atrito com o número de ciclos e com a posição da esfera sobre a amostra.

Fonte: Edição do autor, 2018.

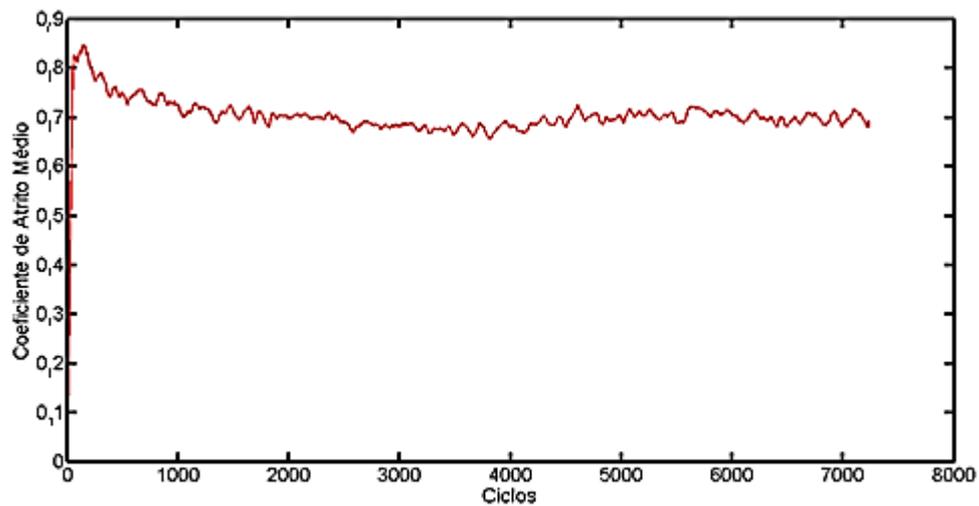
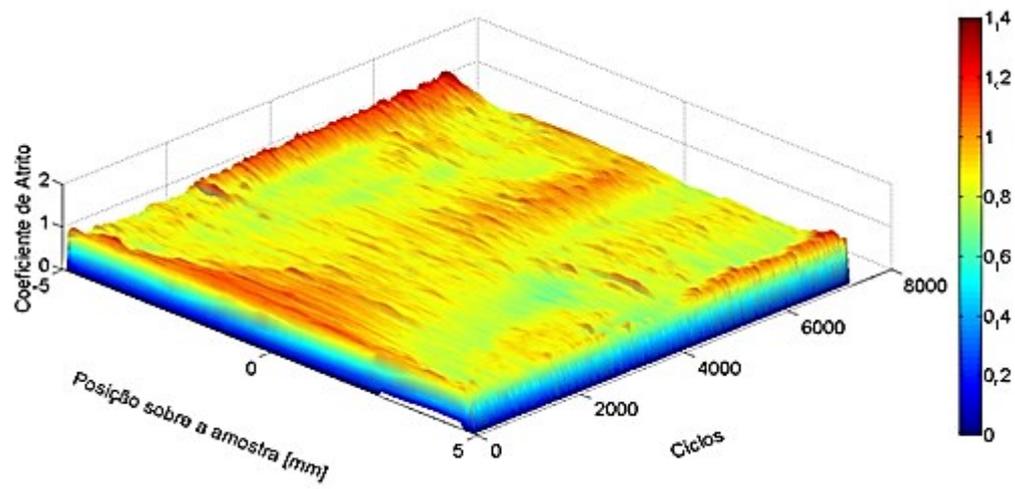


Figura 26- Gráfico do terceiro ensaio da amostra M que relaciona o coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos da amostra.

Fonte: Edição do autor, 2018.



**Figura 27-** Gráfico em 3D do terceiro ensaio da amostra M que relaciona o coeficiente de atrito com o número de ciclos e com a posição da esfera sobre a amostra.

Fonte: Edição do autor, 2018.