

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

GILBERTO GARCIA ROMEIRA JUNIOR
LUIZ FERNANDO VENANCIO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES LATERAIS NO CONTATO
ESFERA-PLANO EM DESLIZAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

(Tcc2 - Nº de Inscrição - 29)

CURITIBA

2017

GILBERTO GARCIA ROMEIRA JUNIOR
LUIZ FERNANDO VENANCIO DA SILVA

**AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES LATERAIS NO CONTATO
ESFERA-PLANO EM DESLIZAMENTO**

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. Giuseppe Pintaúde, Dr.

CURITIBA

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES LATERAIS NO CONTATO ESFERA-PLANO EM DESLIZAMENTO", realizado pelo aluno(s) Gilberto Garcia Romeira Junior e Luiz Fernando Venancio da Silva, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde

DAMEC

Orientador

Prof. Dr. Julio Cesar Klein das Neves

DAMEC

Avaliador

Prof. Dr. Ricardo Fernando dos Reis

DAMEC

Avaliador

Curitiba, 07 de Dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos as nossas famílias, que nunca deixaram de acreditar em nosso potencial, sempre nos apoiando e motivando, além de serem o alicerce de tudo que conquistamos.

Aos nossos amigos, por tornarem essa caminhada menos árdua e maçante, nos dando forças para continuar.

Ao Professor Giuseppe, por acreditar que conseguiríamos e nos ajudar a tornar tudo possível.

RESUMO

ROMEIRA, Gilberto. SILVA, Luiz. **Avaliação das deformações laterais no contato esfera-plano em deslizamento**. 2017. 79 p. Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso - Curso Superior em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

O ensaio de deslizamento se apresenta como uma importante ferramenta para a avaliação do desempenho tribológico de materiais, como por exemplo o coeficiente de atrito. Um aspecto importante no caso de metais é a possibilidade de surgimento de deformação laterais, que podem ser avaliadas tal como as morfologias de impressão em ensaio estático. Este ensaio se caracteriza pelo contato entre duas superfícies, com auxílio de uma pré carga aplicada seguida de uma força tangencial atuando para deslocamento de uma superfície na outra. O objetivo deste trabalho é determinar as características de deformação lateral (razão “s/h”) num contato esfera-plano sob ação cinética, bem como analisar a similaridade de tais resultados com valores da mesma razão baseados em ensaio de dureza (estático) pré-estabelecidos, para três materiais diferentes ; Aço inoxidável AISI 316l, alumínio 6063-T5 e aço carbono AISI 1020, através das propriedades encontradas após ensaio de deslizamento, validando o ensaio, No qual foram aplicadas três forças em cada corpo-de-prova de cada material através de um endentador que é deslocado até um determinado comprimento, proporcionando uma resistência da superfície do material a ser ensaiado fazendo com que haja um acúmulo de material à frente do endentador forçando tal material fluir ao redor , com isso surge uma profundidade nas trilhas geradas pelo endentador, está profundidade é um dos valores importantes a serem utilizados, cabe salientar que o ensaio é realizado a uma determinada velocidade de deslocamento constante para não afetar nos resultados. Os Três materiais forneceram resultados que puderam ser analisados, corroborando a premissa que as características de deformação lateral sob a ação cinética, é bem divergente comparada com a estática, porém o comportamento do materiais apresentaram uma similaridade entre cinético e estático.

Palavras-Chave: Deslizamento. Endentador. Deformação.

ABSTRACT

ROMEIRA, Gilberto. SILVA, Luiz. **Evaluation of the lateral deformation in the sliding sphere-plane contact**. 2017. 79 p. Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso - Curso Superior em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

The sliding test presents itself as an important tool to obtain mechanical properties of materials, such as coefficient of friction, hardness, coefficient of elasticity, and from this test the possibility of analysis of print morphologies arises. This test is characterized by the contact between two surfaces, with the aid of an applied preload followed by a tangential force acting to move one surface in the other. The objective of this work is to determine the characteristics of lateral deformation (" s / h " ratio) in a sphere-plane contact under scratch action, as well as to analyze the similarity of such results with values of the same ratio based on a hardness test (indentation) established, for three different materials; AISI 316l stainless steel, 6063-T5 aluminum and AISI 1020 carbon steel, through the properties found after sliding test, validating the test, where three forces were applied to each specimen of each material through a dozer that is displaced up to a certain length, providing a resistance of the surface of the material to be tested causing an accumulation of material in front of the nozzle forcing such material to flow around, with this a depth emerges in the tracks generated by the nozzle, this depth is one of the important values to be used, it should be noted that the test is performed at a given constant displacement speed so as not to affect the results. The three materials provided results that could be analyzed, corroborating the premise that the characteristics of lateral deformation under the scratch action, is very divergent compared to the indentation, but the behavior of the materials presented a similarity between scratch and indentation.

Keywords: Slipping. Indenter. Deformation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Força de atrito nula	11
Figura 2 – Contato com lubrificante.....	11
Figura 3 - Fenômeno <i>Stick</i>	12
Figura 4 - Fenômeno <i>Slip</i>	12
Figura 5 - Ensaio de dureza Brinell	14
Figura 6 - Representação de um plano inclinado e a orientação adotada.....	15
Figura 7 - Influência do trabalho a frio na resistência mecânica de um aço de baixo carbono	18
Figura 8 - Ilustração para obtenção das forças e suas respectivas deformações na curva força versus deformação de um material com escoamento (ASTM E646, 1998).	19
Figura 9 - (a) Topografia da superfície mostrando as bordas provocadas por penetrador esférico; (b) Topografia da superfície mostrando a retração provocada por penetrador esférico.	20
Figura 10 - Morfologia de impressão de penetrador esférico, com os principais parâmetros: Raio do penetrador, R ; Força aplicada, F ; Profundidade da penetração, h ; Profundidade da penetração de contato, h_c ; raio de contato da impressão, a_c ; raio da impressão, a ; altura de borda/retração, s	22
Figura 11 - Recuperação elástica durante o processo de endentação. - a : raio de endentação, h_e : Recuperação elástica; h_p :profundidade final; h : Máxima profundidade; h_c : profundidade de contato e h_s : profundidade desviada. Adaptado de ISO 14577-1	23
Figura 12 – Resistência ao desgaste relativa \square_i , relacionada a um fator \square_i^* que considera a relação E/H	23
Figura 13 - Esquema do funcionamento do interferômetro de Michelson, conforme incidência de luz.	25
Figura 14 -- Comprimento dos corpos-de-prova.	27
Figura 15 - Coeficiente de atrito médio no Aço carbono AISI 1020 ao longo de todo trajeto, utilizando uma carga normal aplicada de 32 N.	30
Figura 16 - Trilhas após ensaios de deslizamento	30
Figura 17 - Vista da região útil utilizada para a verificação dos parâmetros “ s ” e “ h ”.....	32
Figura 18 - Perfil de impressão Aço carbono AISI 1020	32

Figura 19 - Força tangencial <i>versus</i> carga aplicada- (a) Aço carbono AISI 1020 e Aço inoxidável AISI 316L – (b)- Alumínio 6063- T5	33
Figura 20 - Morfologias de impressão da amostra Aço Inoxidável AISI 316L com (a)carga de 52N,	36
Figura 21 - Morfologias de impressão da amostra Aço Carbono AISI 1020 com (a)carga de 32N,	37
Figura 22 - Morfologias de impressão da amostra Alumínio 6360 T-5 com (a) carga de 25N,	38
Figura 23 - Valores de $\ln (E/H)$ versus h_c/h , levando em consideração apenas as propriedades E e H.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de carga aplicada.....	28
Tabela 2: Resultados médios do coeficiente de atrito pelo ensaio de deslizamento.....	30
Tabela 3: Resultados médios do ensaio de determinação do perfil de impressão.....	35
Tabela 4: Resultados médios do ensaio de determinação do perfil de impressão obtidos por Cipriano, 2008.....	41
Tabela 5: Resultados da relação $h_c \setminus h$ em relação a $E \setminus H$	42

LISTA DE SÍMBOLOS

n - Coeficiente de encruamento

s - Altura do fim do contato do penetrador e superfície do material

h - Profundidade de impressão em relação à superfície

N - Unidade de medida -Newton

μ - Coeficiente de atrito

μ_e - Coeficiente de atrito estático

μ_c - Coeficiente de atrito cinético

S_c - Área da superfície

ρ - Profundidade de impressão

h_c - Profundidade da impressão em relação ao final do contato entre esfera e material

E - Módulo de Elasticidade

\emptyset - Indicação de diâmetro

D - Diâmetro do penetrador

R - Raio do penetrador

d - Diâmetro impresso no material após retirada da carga aplicada

a - Raio de contato na impressão em relação a superfície do material

a_c - Raio de contato na impressão do material em relação ao final do contato entre esfera e material

c^2 - grau de bordas e/ou retrações.

H - Indicação de dureza

F - Força aplicada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 CONTEXTO DO TEMA.....	8
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	9
1.3 OBJETIVOS.....	9
1.3.1 Objetivo Geral.....	9
1.3.2 Objetivos Específicos	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1 MECÂNICA DE CONTATO	11
2.1.1 Introdução	11
2.1.2 Contato sem atrito.....	11
2.1.3 Contato com atrito	12
2.2 ENSAIO DE DUREZA.....	13
2.2.1 Introdução	13
2.2.2 Dureza Brinell	13
2.3 ATRITO	14
2.3.1 Introdução	14
2.3.2 Atrito em corpos sólidos.....	16
2.3.3 Atrito estático e cinemático	16
2.4 TRIBOLOGIA	16
2.4.1 Introdução	16
2.4.2 Tipos de desgaste realizados na tribologia.....	17
2.4.3 Tribômetro.....	17
2.4.4 Ensaio de Riscamento.....	17
2.5 ENCRUAMENTO	18
2.6 MORFOLOGIAS DE IMPRESSÃO (“PILE-UP” e “SINK-IN”).....	20
2.7 RELAÇÃO E/H	22
2.8 INTERFEROMETRIA OPTICA	24
3. METODOLOGIA	26
3.1 INTRODUÇÃO A METODOLOGIA DO TRABALHO	26
3.2 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DO TRABALHO.....	26
3.3 TRIAGEM E AVALIAÇÃO DE INFORMAÇÕES.....	Erro! Indicador não definido.

3.4 DETERMINAÇÃO DA FORÇA PARA ENSAIO	27
3.5 ENSAIO DE DESLIZAMENTO	29
3.6 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES LATERAIS POR INTERFEROMETRIA ÓPTICA	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
4.1 COEFICIENTE DE ATRITO	33
4.2 DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES LATERAIS.....	35
4.2.1 RELAÇÃO S/H	35
4.2.2 RELAÇÃO E/H	40
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
REFERÊNCIAS.....	43
ANEXO A – GRÁFICO DO COEFICIENTE DE ATRITO VERSUS TEMPO	47
ANEXO B – PERFIL DE IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO DE DESLIZAMENTO	56
ANEXO C – GRÁFICO DO COEFICIENTE DE ATRITO VERSUS TEMPO	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DO TEMA

O contato de superfícies existe quando duas superfícies são colocadas em paralelo e planas, ocorrendo assim um contato pertinente em determinados pontos, em que os mesmos são responsáveis diretos por suportar a carga normal, desempenhando um papel importante em fenômenos como desgaste e atrito (ZHANG 2016).

O contato de superfícies pode ser utilizado com diferentes conceitos e aplicações, como por exemplo o processo de endentação esférica em matérias elasto-plásticos que é o caso dos materiais abordados neste trabalho.

O processo de endentação esférica consiste em utilizar uma esfera de alta rigidez para servir como objeto de pressão com uma carga pré-estabelecida sobre uma superfície sólida, proporcionando a possibilidade de caracterização da morfologia de impressão resultante da deformação plástica residual do material.

Convém analisar a superfície deixada pelo contato entre a esfera e o material, de modo que em materiais elasto-plásticos, o campo de trabalho utilizado em torno da área de contato pode ser deformado plasticamente no sentido positivo ou negativo do eixo z onde a força é aplicada (mesmo sentido da aplicação da força). Esse comportamento é chamado pile-up (ou borda), no primeiro caso e sink-in (ou retração), no segundo caso, definido por Pintaude (2002). Quando ocorre o excesso de deformação elástica no processo de endentação, está ocorrendo uma retração. Já quando o mecanismo de deformação no processo de endentação possui predominantemente deformação plástica, há formação de bordas como consequência (TALJAT et al., 2004).

Nas superfícies que sofrem esse contato, por menos rugosas que sejam sempre haverá asperezas em escalas microscópicas, logo com a aplicação da carga normal essas asperezas tendem a se juntar. Quando a força tangencial excede um determinado valor estaticamente, ocorre o deslizamento das superfícies, uma sobre a outra, ocasionando um aumento na junção de asperezas, o que pode modificar consideravelmente o coeficiente de encruamento do material (SMERDOVA, 2014).

O encruamento do material é definido como o endurecimento por deformação a frio, assim, com a ação da força agindo sobre o corpo de prova, o material vai se tornando mais

resistente. Tal etapa designa-se por meio da observação do aumento contínuo da tensão, à medida que o ensaio se processa após o escoamento, existindo devido às diferentes interações entre as discordâncias que anulam o escorregamento dos planos cristalográficos, formando barreiras para a deformação (SOUZA, 1982).

O coeficiente de encruamento, designado pela letra “ n ”, é uma importante propriedade mecânica para superfícies metálicas em contato, pois determina a capacidade com que o material distribui a deformação após o esforço mecânico. Estaticamente, há uma série de modelos matemáticos relacionando a geometria da impressão de dureza, por exemplo, com o coeficiente de encruamento. Desta forma, espera-se que cineticamente esta mesma propriedade também afete o contato mecânico entre metais.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Para um conjunto de metais de propriedades mecânicas conhecidas, Cipriano (2008) determinou o valor das morfologias de impressão, e conseqüentemente o coeficiente de encruamento, a partir de ensaios estáticos (dureza). De posse destes materiais, após ensaio de deslizamento, pode-se verificar a possibilidade de mesmo comportamento quanto à morfologia de impressão/deformações laterais em caso estático e cinético.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Determinar as características de deformação lateral (estimadas pela razão “ s/h ”) num contato esfera-plano sob ação cinética, bem como analisar a similaridade de tais resultados com valores da mesma razão baseados em ensaio de dureza (estático) pré-estabelecidos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para cumprimento do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Obter o coeficiente de atrito, sob ação cinética, para os três materiais ensaiados com propriedades conhecidas; e
- Avaliar as morfologias associadas à geometria do risco.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MECÂNICA DE CONTATO

2.1.1 Introdução

Praticamente todos os problemas físicos envolvem contato mecânico, logo, na engenharia não seria diferente, como por exemplo, no estudo em questão, o qual envolve o contato entre uma esfera de endentação e um corpo metálico.

Segundo Sampaio (2009), a mecânica de contato pode influenciar diretamente na resposta do problema. Por isso, deve-se levar em consideração os efeitos de rugosidade, temperatura, fragilidade, plasticidade, entre outros, para que se obtenha valores satisfatórios ao final do trabalho.

2.1.2 Contato sem atrito

Ocorre quando dois sólidos deslizam sem que haja resistência, ou seja, sem o efeito da força de atrito (Figura 1). Para que ocorra este fenômeno, utiliza-se de lubrificantes entre os sólidos, conforme Figura (2).

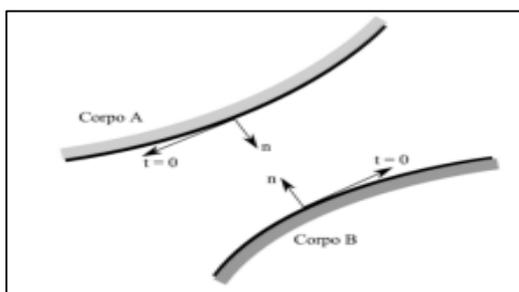


Figura 1 - Força de atrito nula
Fonte: Sampaio, 2009

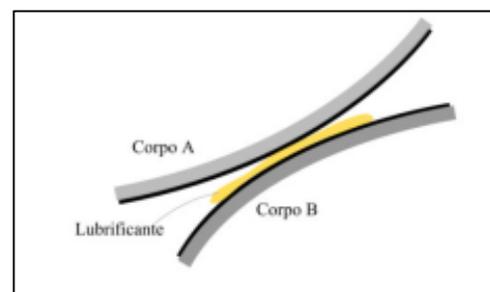


Figura 2 – Contato com lubrificante
Fonte: Sampaio, 2009

2.1.3 Contato com atrito

Ocorrem duas situações ao levar em conta o atrito:

- *Stick*: A força de atrito da superfície impede o deslizamento. Tal força é considerada como sendo a componente tangencial. Na ocorrência do *stick*, tem-se que o limite de atrito é maior do que a componente tangencial (t), conforme figura 3 (SAMPAIO, 2009).

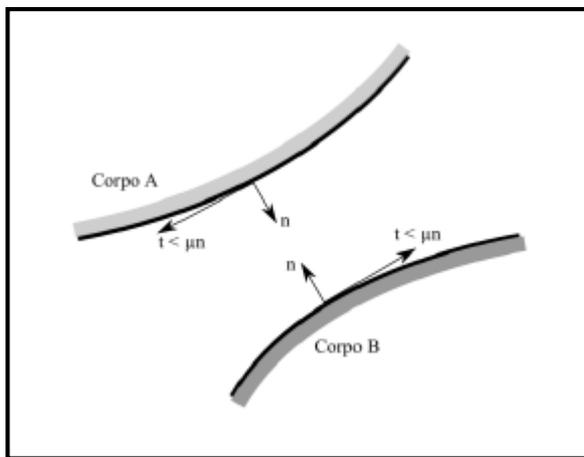


Figura 3 - Fenômeno *Stick*
Fonte: Sampaio, 2009

- *Slip*: Neste caso tem-se o limite da força de atrito atingido, logo, a componente tangencial é igual a este limite, conforme Figura 4 (SAMPAIO, 2009).

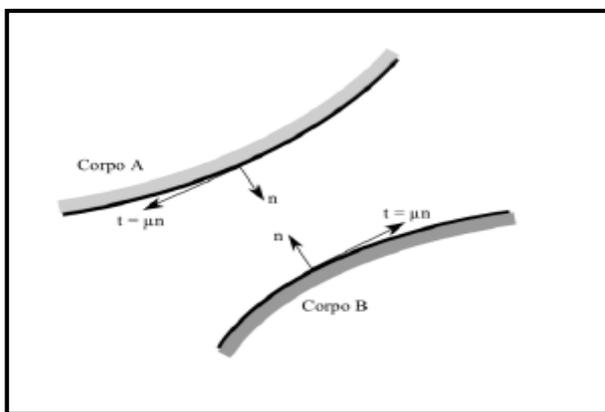


Figura 4 - Fenômeno *Slip*
Fonte: Sampaio, 2009

2.2 ENSAIO DE DUREZA

2.2.1 Introdução

A propriedade mecânica da dureza é difundida para a especificação de materiais, bem como nos estudos mecânicos. Tal propriedade determina a resistência à penetração de um material no outro, tal designação é dada segundo o olhar de um engenheiro. As definições podem variar dependendo da experiência de cada estudante no assunto. Logo, é difícil encontrar um único conceito para dureza. A partir disso, o ensaio de dureza pode ser dividido em três tipos: penetração, choque e riscamento (SOUZA, 1982).

A primeira escala qualitativa e arbitrária utilizada para representar a dureza, para os minerais, foi determinada como escala de Mohs, no qual estavam rearranjados por ordem de riscamento. Esta técnica não foi muito disseminada para a medição da dureza em materiais metálicos (CIPRIANO 2008).

Para os materiais metálicos, foram desenvolvidos técnicas, as quais consistem, basicamente, em aplicação de uma carga sobre a superfície deformando-a, e a partir de medidas obtidas com uso de endentador de impressão determinar a dureza do material (CIPRIANO 2008).

2.2.2 Dureza Brinell

Proposta por J.A. Brinell em 1900, a dureza Brinell é obtida através da ação de uma carga Q , a qual comprime uma superfície, vagarosamente, com uma esfera de diâmetro D , durante certo instante de tempo. Tal ação causa uma impressão, permanente, em forma de calota esférica de diâmetro d , que é medido, após a remoção da carga, conforme Figura 5. Após a obtenção do diâmetro de impressão, a dureza é obtida através da equação (1), além de ser relacionada com que é medida em N/mm^2 (SOUZA, 1982).

$$HB = \frac{Q}{Sc} = \frac{Q}{\pi D \rho} = \frac{Q}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

sendo:

S_c a área da superfície;

ρ a profundidade de impressão.

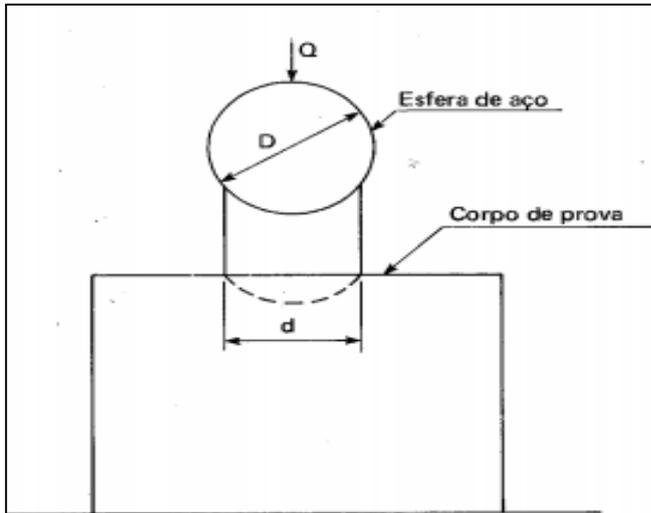


Figura 5 - Ensaio de dureza Brinell
Fonte: SOUZA (1982).

Após a aplicação da carga Q , a região afetada deforma-se plasticamente, porém, ao retirar a carga ocorre uma recuperação elástica nesta região, tornando, assim, o raio de curvatura de impressão maior, ou seja, gerando erros na determinação da dureza (SOUZA, 1982).

2.3 ATRITO

2.3.1 Introdução

Os primeiros estudos do atrito remontam ao trabalho de Leonardo da Vinci do final do século XIX (SINATORA, 2005). Leonardo da Vinci evidencia que o atrito dependia da interação de compressão entre os corpos, e não da área de contato entre os mesmos, com isso a força de atrito consiste em forças interatômicas, ou seja, força originada através da interação entre os átomos (SINATORA, 2005).

O atrito tem grande importância no processo de conformação, pois detém uma grande contribuição para o sucesso do mesmo. Já na laminação, o atrito, atua na interface entre peça e os rolos, transmitindo energia necessária para deformar a peça (BOESCH, 2011).

O Atrito depende basicamente de três fatores: materiais envolvidos, topografia dos corpos e condições de trabalho (BOESCH, 2011). Baseado nos estudos de Leonardo da Vinci, Euler desenvolveu a equação (2)

$$|\vec{F}_{at}| = \mu |\vec{N}| \quad (2)$$

na qual demonstra que a força de atrito é diretamente proporcional ao módulo da força normal entre um corpo e a superfície de contato (HALLYDAY, 2003).

Euler, foi o primeiro a definir o coeficiente de atrito estático (μ_e) e o coeficiente de atrito cinético (μ_c), evidenciou que o atrito estático é, na maioria das vezes, maior que o atrito cinético. Além de mostrar que o atrito cinético não depende da velocidade com que o corpo desce o plano inclinado, Figura 6 (SINATORA, 2005).

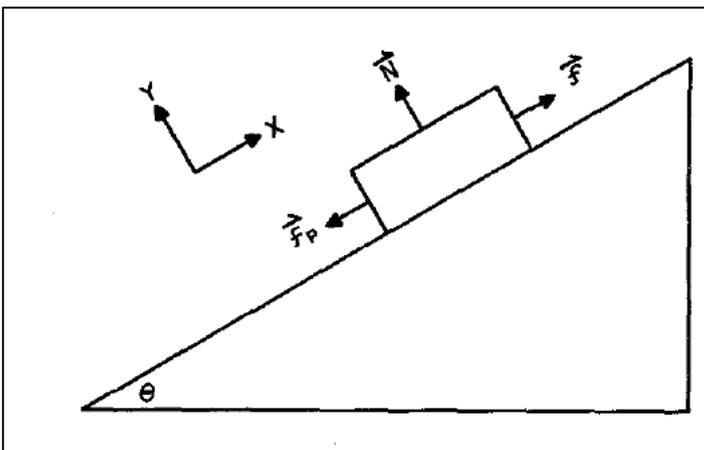


Figura 6 - Representação de um plano inclinado e a orientação adotada.

Fonte: Sinatora (2005)

2.3.2 Atrito em corpos sólidos

A conotação, corpos, exclui da análise dois fenômenos da tribologia o desgaste por partículas líquida e a cavitação (SINATORA, 2005).

Segundo Rabinowicz (1965), o atrito é a resistência ao movimento quando um objeto sólido é movido tangencialmente em relação à superfície de outro corpo que ele toca.

2.3.3 Atrito estático e cinemático

O coeficiente de atrito estático é determinado quando há ausência de movimento relativo atuando na superfície de dois corpos em contato, caso haja força de atrito, é denominado força de atrito estática, equação (3) (SINATORA, 2005).

$$F_{at} = \mu_e N \quad (3)$$

O coeficiente de atrito dinâmico deriva do movimento relativo entre as superfícies em contato dos corpos. Logo, a força de atrito, para este caso, é denominada de força de atrito cinético, equação (4) (SINATORA, 2005).

$$F_{at} = \mu_c N \quad (4)$$

2.4 TRIBOLOGIA

2.4.1 Introdução

As primeiras citações do termo tribologia foram utilizadas no relatório feito por Jost, em 1966, para o departamento inglês de educação (OLIVEIRA, 2015). Segundo Sinatora (2005), a ciência que estuda o desgaste e o atrito, bem como a lubrificação para diminuir os

efeitos dos mesmos, é denominada de tribologia. Tal ciência baseia-se em conhecimentos já fundamentados, como física, química, mecânica e ciência dos materiais.

Uma das mais importantes contribuições de Leonardo da Vinci para a engenharia foi a lubrificação como fonte de diminuição da força de atrito (SINATORA, 2005).

2.4.2 Tipos de desgaste realizados na tribologia

Existem quatro tipos de desgaste na tribologia: Adesivo; Abrasivo; Fadiga; Corrosivo (RADI, 2007). Como este trabalho utiliza-se de ensaio de riscamento, focar-se-á no tipo de desgaste abrasivo.

2.4.3 Tribômetro

O tribômetro tem a finalidade de medir propriedades como atrito e desgaste sob condições específicas. Além de envolver estudos sobre as condições de usabilidade do material (JOST, 1990).

Para este trabalho, utilizou-se o tribômetro com o intuito de identificar o coeficiente de atrito, através do ensaio de riscamento linear.

O tribômetro é dividido em unidade superior, na qual encontra-se o sensor de carga, que tem a função de exercer a carga pré-determinada pelo usuário na interface (RADI, 2007). Na unidade superior é fixada a esfera de endentação. No presente, foi utilizado um sensor que detém uma carga variável de 20-180 N. O tribômetro é composto, também, pela unidade inferior, que é responsável pela fixação do corpo de prova.

2.4.4 Ensaio de Riscamento

O ensaio de riscamento é utilizado para avaliação de adesão em recobrimentos. Nos seus primórdios era aplicado em recobrimentos finos. É considerado um ensaio simples e

barato. Tem a possibilidade de ser aplicado em materiais metálicos, cerâmicos e polímeros (BALOTIN, 2010).

A sequência para a aplicação do ensaio baseia-se em, primeiramente, posicionar a amostra no tribômetro, escolher a esfera de endentação de diâmetro d , determinar as variáveis na interface, como velocidade de deslocamento, pré-carga, comprimento de risco e espaçamento entre riscos. Após realizar o ensaio, na interface, é obtido o valor do coeficiente de atrito, o qual é o objetivo do ensaio.

2.5 ENCRUAMENTO

Segundo Dieter (1967), o encruamento do metal ocorre quando há o aumento da dureza do mesmo, devido à deformação a frio, causando modificações na estrutura. Quanto maior a deformação do material, maior a resistência adquirida (Figura 7).

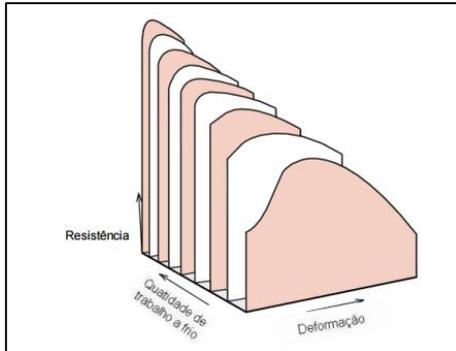


Figura 7 - Influência do trabalho a frio na resistência mecânica de um aço de baixo carbono
Fonte: Callister (2002)

Tal fenômeno ocorre devido a movimentação das discordâncias, as quais interagem entre si ou com outras imperfeições. Com isso, há redução na mobilidade das mesmas, sendo necessária uma tensão maior para provocar maior deformação plástica (DIETER 1967).

Devido ao fato de que o encruamento ocorre em temperaturas abaixo da temperatura de recristalização, o encruamento também é denominado de trabalho a frio (CALLISTER, 2002).

O coeficiente de encruamento “ n ” é designado como o expoente da relação entre a tensão e deformação, prescrito de acordo com a equação da conservação de energia relatada por Hollomon (1945), com isso o coeficiente de encruamento do material proporciona a

visualização do incremento de tensão para cada incremento da deformação do material. Quanto maior for o limite de resistência do material, maior será o coeficiente de encruamento, e quanto maior o coeficiente de encruamento, maior será o limite de deformação do material (HOECHELE 2011).

De maneira teórica o coeficiente de encruamento, n , pode ser obtido através da curva tensão versus deformação verdadeira, e para encontra-lo é obrigatório a medição, no mínimo, de cinco forças durante o ensaio e suas respectivas deformações conforme indicado na figura 8, onde o mesmo é caracterizado pelo coeficiente angular podendo ser calculado pela regressão linear da equação 6 em que é preciso linearizar a curva tensão *versus* deformação verdadeira na região onde se encontra o encruamento, obtendo a equação 5 (ASTM E646, 1998).

i

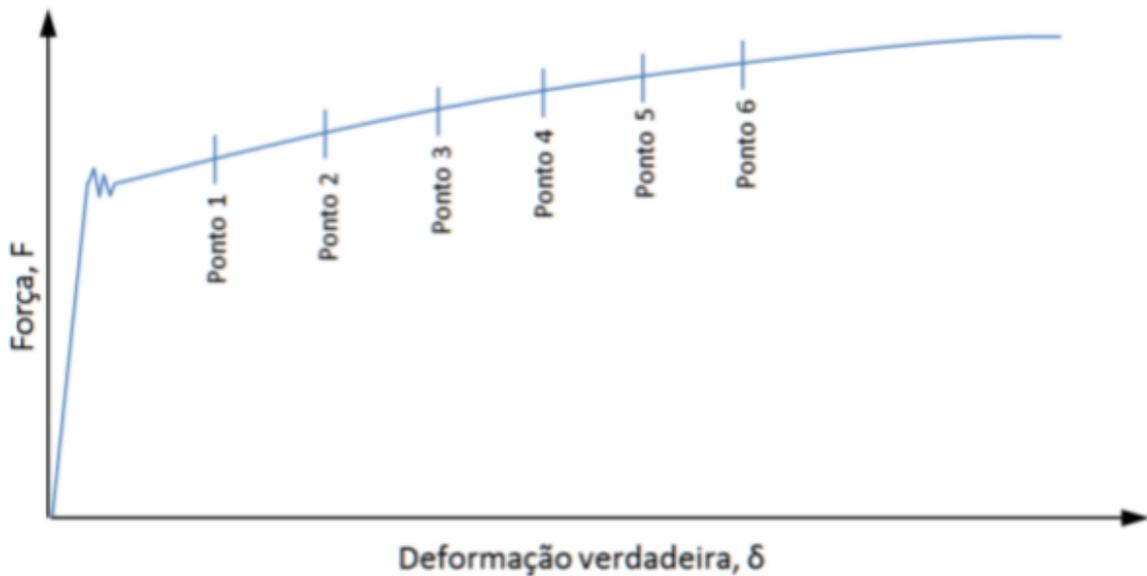


Figura 8 - Ilustração para obtenção das forças e suas respectivas deformações na curva força versus deformação de um material com escoamento (ASTM E646, 1998).

$$\log \sigma_v = \log K + n * \log \delta \quad (5)$$

$$n = \frac{N * \sum_{i=1}^N (\log \delta_i * \log \sigma_i) - (\sum_{i=1}^N \log \delta_i * \sum_{i=1}^N \log \sigma_i)}{N * (\sum_{i=1}^N (\log \delta_i)^2) - (\sum_{i=1}^N \log \delta_i)^2} \quad (6)$$

Vale ressaltar que os efeitos do encruamento são revertidos ao aquecer o metal a uma temperatura de recristalização (CALLISTER, 2002).

2.6 MORFOLOGIAS DE IMPRESSÃO (“PILE-UP” e “SINK-IN”)

O diâmetro da impressão é uma informação complicada de garantir estabilidade em seu valor, já que se têm inúmeras variáveis que podem contribuir para distorcer sua real aparência, como demonstrado na Figura 9, interferindo diretamente no valor da área de contato, que por sua vez, é o fator com maior influência na determinação de propriedades mecânicas (CIPRIANO 2008). Tal diâmetro pode sofrer interferência pela formação de bordas, as quais aparecem trazendo consigo morfologias de impressão indesejáveis, como por exemplo, o *pile-up* e o *sink-in*. No presente trabalho *pile-up* será referido como “formação de bordas” e *sink-in* como “retração”, conforme proposta para os termos em português feita por Pintaúde (2002).

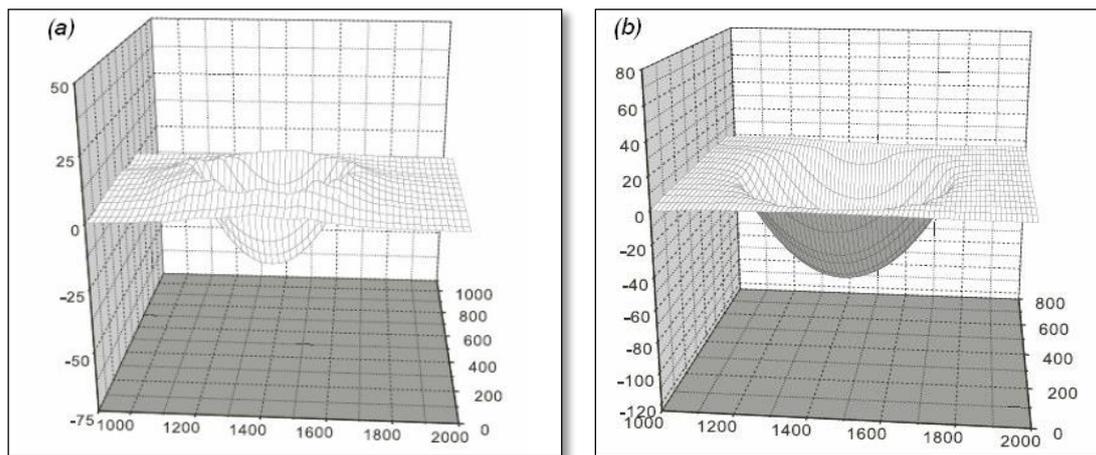


Figura 9 - (a) Topografia da superfície mostrando as bordas provocadas por penetrador esférico; (b) Topografia da superfície mostrando a retração provocada por penetrador esférico.
Fonte: Cipriano (2008).

A formação de bordas de impressão, afeta diretamente as propriedades mecânicas dos materiais, fazendo com que haja uma modificação da impressão, originando um aumento (bordas), ou diminuição (retração), do diâmetro de impressão encontrado, em relação ao diâmetro real fornecido por testes em que o bordas e o Sink-in não aparecem. Tais bordas de impressão consistem em ser um agrupamento do material ao redor da impressão, quando a carga aplicada não está agindo sobre o material (BOLSHAKOV E PAHARR, 1998; CHENG E CHENG, 2000; TALJAT, 2004).

As bordas, como já citado, tem como resultado o diâmetro de impressão maior, e uma significativa redução da dureza, acarretando, na modificação da morfologia, sendo originadas

na convergência da fronteira da calota esférica. Determina-se que caso o mecanismo de deformação no decorrente processo de endentação possua, predominantemente, deformação plástica, é constatada a formação de bordas.

A retração é denominada, ao contrário das bordas, quando o mecanismo de deformação no processo de endentação tem grande quantidade de deformação elástica, proporcionando um amassamento das bordas, defronte a fronteira da calota esférica, fazendo com que, o diâmetro de impressão seja menor, alterando de maneira grosseira a obtenção de propriedades mecânicas, além de ocasionar o aumento da dureza (TALJAT, 2004; TABOR, 1951; MATTHEWS, J. R., 1980)

A fim de encontrar uma relação, levando em consideração o deslocamento contínuo do penetrador e a área de contato, há muitos estudos, trabalhos numéricos e experimentais, realizados, onde foi desenvolvida uma equação para tal relação. A equação (5)

$$a^2=2c^2hR \quad (7)$$

em que:

- a é o raio da impressão obtida
- h é a profundidade máxima da penetração abaixo da superfície original
- R é o raio do penetrador

denomina o grau de formação de bordas ou o retração (c^2), em função da altura da borda s , como pode ser observado na Figura 10. Assim quando $c^2 > 1$ indica que há a predominância de bordas, e quando $c^2 < 1$, indica a ocorrência de retração (HILL, 1989; KUCHARSKI, 2001; ALCALÁ, 2000).

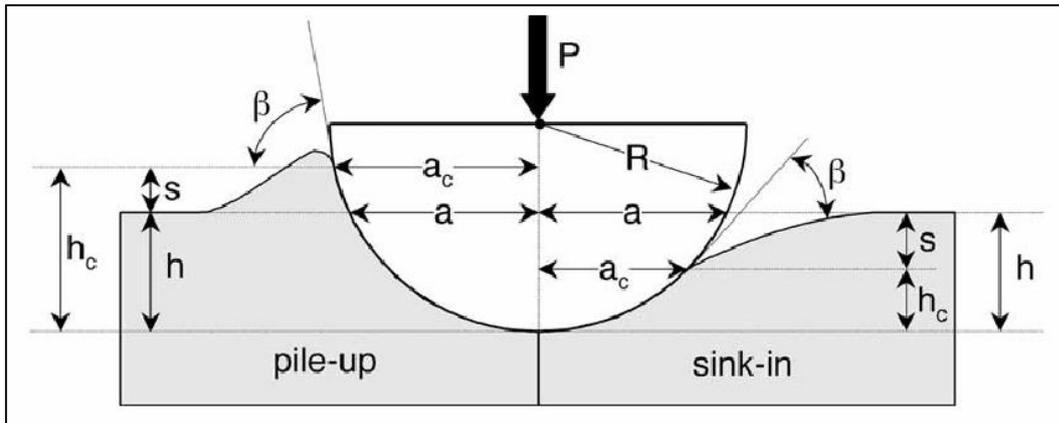


Figura 10 - Morfologia de impressão de penetrador esférico, com os principais parâmetros: Raio do penetrador, R ; Força aplicada, F ; Profundidade da penetração, h ; Profundidade da penetração de contato, h_c ; raio de contato da impressão, a_c ; raio da impressão, a ; altura de borda/retração, s .

Fonte: Taljat et al. (2004).

Pode-se determinar o respectivo valor da altura da borda, s , levando em consideração à superfície do material analisado. O Ângulo β , caracteriza-se como ponto que se refere o final da superfície de contato entre a esfera e o material e proporcionando um melhor entendimento quanto aos parâmetros obtidos a partir deste ponto, os quais são descritos com o sufixo, c , subscrito, indicando que a referência é determinada como o ponto de contato entre esfera e o material (HOECHELE, 2011).

Através da morfologia da impressão foram retirados dados de encruamento, como por exemplo o coeficiente de encruamento “ n ” muito utilizado no segmento de análises para determinação das comparações entre os materiais utilizados. Porém, para tal determinação experimental, de maneira cinética, foi desconsiderado o ângulo β .

2.7 RELAÇÃO E/H

A partir de um ensaio de deslizamento há a ocorrência de deformação plástica do material, como já citado em outros momentos dentro do presente trabalho, porém sempre há a recuperação de uma pequena parcela elástica em que alguns parâmetros podem ser extraídos conforme figura 11, tal recuperação está diretamente ligada a dureza do material e assim a resistência ao desgaste também é levada em consideração.

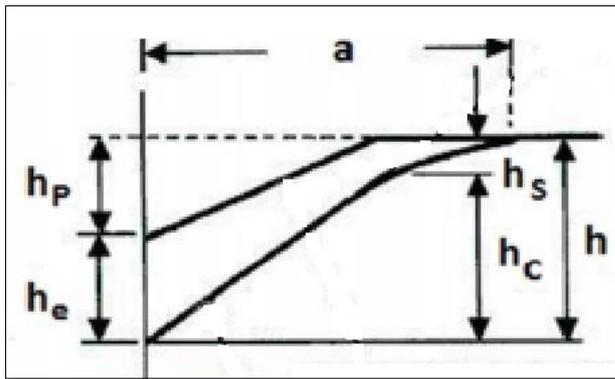


Figura 11 - Recuperação elástica durante o processo de endentação. - a: raio de endentação, h_e : Recuperação elástica; h_p :profundidade final; h : Máxima profundidade; h_c : profundidade de contato e h_s : profundidade desviada. Adaptado de ISO 14577-1

No caso de ensaios de riscamento com penetrador Berkovich, convém relatar que Jardret et al (1998), determinou uma equação que correlaciona a formação de borda com a relação E/H , dependendo do nível de carga, conforme equação 8

$$\frac{h_c}{h} = 0,41498 \ln \frac{E}{H} - 0,14224 \quad (8)$$

Além da relação direta com as deformações laterais, e por causa desse fato, a relação E/H pode ser usada para avaliar a resistência ao desgaste relativa (β_i), tal como apresentado por Torrance (1988), como mostra a Figura 12.

$$\beta_i^* = \frac{H}{H_{ref}} \frac{(1+10H_{ref}/E_{ref})}{(1+10H/E)} \quad (9)$$

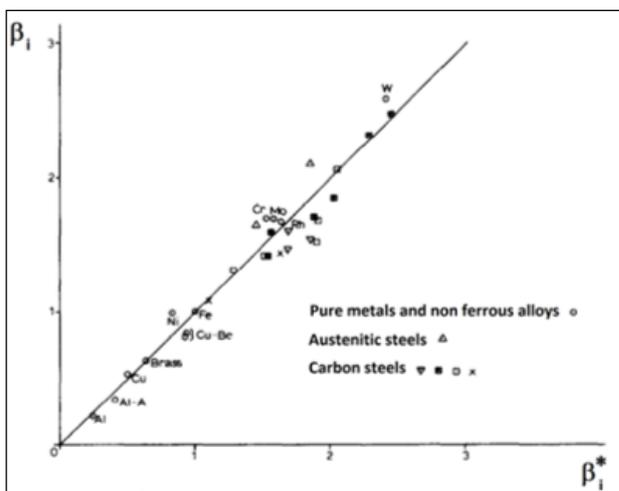


Figura 12 – Resistência ao desgaste relativa β_i , relacionada a um fator β_i^* que considera a relação E/H

Fonte: Torrance, 1988

2.8 INTERFEROMETRIA ÓPTICA

O interferômetro de luz tem como função principal realizar a medição de comprimentos, ângulos, etc., aproveitando a interferência de ondas eletromagnéticas (FRAGNITO et al.,2010). A medição interferométrica tem como base a utilização de basicamente uma fonte de luz (emitindo feixes), um sistema óptico (interferómetro) e um detector convertendo as divergências de intensidade luminosa num sinal mesurável (JONES, 1989).

O conceito do interferómetro nada mais é, que um conjunto de configurações (sistema) óptico para analisar a interação ou até mesmo a sobreposição de duas ou mais fases de onda (com auxílio de feixes de luz), designadas de interferência construtiva, quando ambas as ondas estão em fase, e interferência destrutiva, quando estão em fases opostas, ou seja auxilia na análise e caracterização das morfologias de impressão, proporcionando uma melhor configuração de ensaios anteriores.

Os feixes de luz emitidos pela fonte luminosa, tem de seguir um critério de coerência em termos de frequência e em termos de fase para a realização de interferência. Com isso são destacadas duas maneiras de se criar interferómetros segundo Jones(1989).

- 1) Divisão de frente de onda
- 2) Divisão de amplitude, que consiste na divisão do feixe por reflexão.

As interferências das ondas são determinadas em instrumentos eletrônicos de medida, como por exemplo “interferómetro de Michelson”. Tal equipamento proporciona a interação de ondas luminosas envolvendo um esquema de varredura, no qual se procura uma posição de máximo contraste em relação ao ponto da imagem da peça medida, com base na posição designada ao dispositivo de varredura, que tem coordenada vertical Z, formando assim, uma grande porção de pontos da superfície medida, onde são retirados parâmetros geométricos (ALBERTAZZI, 2008).

O interferómetro de Michelson é mostrado na Figura 13.

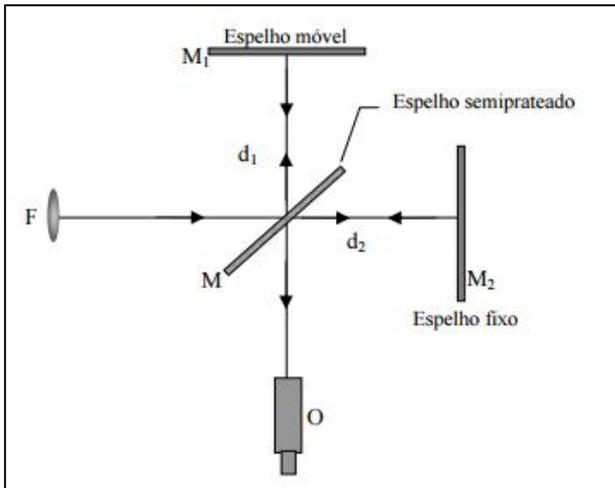


Figura 13 - Esquema do funcionamento do interferômetro de Michelson, conforme incidência de luz.
Fonte: Albertazzi (2008)

Onde M é um espelho semitransparente, M_2 um espelho fixo disposto a uma distância d_2 , e outro móvel (M_1), disposto a uma distância d_1 .

O funcionamento do interferômetro de Michelson começa quando há incidência da luz, que se divide em M diretamente em séries iguais, na qual, uma dessas séries reflete sobre si mesma no espelho fixo, e também acaba sendo refletida no espelho semitransparente na direção y negativo (Olho do observador). A segunda série, também reflete sobre si no espelho móvel, transmitindo a luz incidente por M, interferindo no anteparo entrando em convergência com a primeira série (FRAGNITO et al., 2010).

Uma outra maneira de determinar as dimensões, seguindo o princípio do interferômetro de Michelson, é a utilização de Perfilometro óptico 3D, no qual proporciona medição de acabamento superficial e espessura de camada dentro de um campo de trabalho de 300 nm a 1,5 m, embasada a uma resolução de 0,1 Angstrom, excelente para a extração dos valores dos testes necessários neste trabalho.

Vale ressaltar que a utilização da interferometria foi de suma importância para a obtenção do resultado do trabalho de Do Vale (2017), que tinha o intuito de comparar a resistência ao risco de ferros fundidos cinzentos e vermiculares, levando em conta a atuação do atrito, a geometria de impressão da trilha e a contagem de grafita. Uma das conclusões do trabalho foi determinada através da análise comparativa entre as geometrias das trilhas, onde, Do Vale (2017), pode constatar que a presença da grafita alterou abruptamente a geometria de impressão.

3. METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO A METODOLOGIA DO TRABALHO

Este capítulo tem como principal intuito expor e explicar o método utilizado para execução do procedimento experimental, além das características dos materiais, objetos de análise, e dos equipamentos utilizados.

3.2 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DO TRABALHO

Para a realização do presente trabalho, serão utilizados três corpos-de-prova diferentes quanto ao grupo do material, sendo eles, alumínio 6063-T5, aço carbono AISI 1020, e aço inoxidável AISI 316L, além de alguns parâmetros importantes, tais como:

- Esfera de 4 mm
- Carga máxima utilizada 100N

A escolha dos materiais citados tem como base a relação entre o módulo de elasticidade e o coeficiente de encruamento, logo, leva em consideração que o aço carbono AISI 1020 tem um módulo de elasticidade muito semelhante ao do aço inoxidável AISI 316L, se diferenciando no coeficiente de encruamento. Já a alternativa da utilização do alumínio 6063-T5 é completamente oposta, assim é um material que apresenta um coeficiente de encruamento muito parecido ao do aço carbono AISI 1020, mas com módulo de elasticidade consideravelmente menor, conforme tabela 1 (CIPRIANO 2008). A determinação dos materiais utilizados teve como base os mesmos trabalhos por Cipriano, já que o foco deste trabalho é realizar um estudo de comparação entre os resultados obtidos com os valores adquiridos por ele.

Tabela 1 – Valores de dureza e coeficientes de encruamento

Material	Dureza (HB)	Coefficiente de encruamento "n" (ensaio de tração)	Módulo de Elasticidade (E)
aço inoxidável AISI 316L	237	0,481	211,29
aço carbono AISI 1020	145	0,080	212,38
alumínio 6063-T5	83	0,129	63,96

Fonte: Cipriano (2008)

Os corpos de prova possuem 50 mm de comprimento (Figura 14) e 12,7mm de diâmetro.

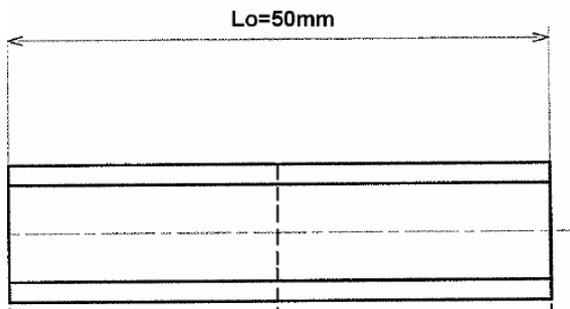


Figura 14 -- Comprimento dos corpos-de-prova.

Fonte: Cipriano (2008)

3.3 DETERMINAÇÃO DA FORÇA PARA ENSAIO

O ponto de partida foi a escolha do valor de 100N para a carga (F_1), carga utilizada no ensaio de riscamento. A carga de 100N determinada para a execução do trabalho foi escolhida para o material aço inoxidável AISI 316L, uma vez que o mesmo tem a maior dureza dentre os materiais em questão, sendo a maior carga utilizada. Tal carga foi estipulada a partir de um critério que tem como objetivo, manter a mesma profundidade de impressão em cada material, ou seja, determinou-se um diâmetro de impressão base, calculado em seguida. Cabe salientar que tal hipótese foi considerada devido à célula de carga do tribômetro utilizado ter a limitação de 180N, com carga nominal de 200N.

As demais cargas são obtidas através da equação da dureza Brinell (1). Assim, é necessária ter em mãos a variável da dureza, determinada conforme ensaios realizados por Cipriano, 2008. Tais valores podem ser observados na Tabela 1.

A partir dos valores de carga e dureza obtidos, é calculado o diâmetro de impressão da calota, pela equação (10).

$$d_1 = \sqrt{D^2 - \left(\frac{D+2F}{\pi DHB}\right)^2} \quad (10)$$

Com a determinação do Diâmetro de impressão (d_1) para a primeira carga, utiliza-se a equação 10 para a determinação do segundo diâmetro de impressão (d_2). Substituindo em (11), será encontrada a segunda força (F_2) para o aço inoxidável AISI 316L. Para encontrar a última carga aplicada (F_3) nesse corpo de prova, utiliza-se o diâmetro (d_3), encontrado a partir da equação (11). Utilizando os valores de diâmetro, d_1 , d_2 e d_3 , encontrados para o aço inoxidável AISI 316L, e a dureza para os respectivos materiais, através da equação da dureza de Brinell (10), são obtidas as cargas a serem utilizadas no aço carbono AISI 1020, denominadas como F_4 , F_5 e F_6 , e no alumínio 6063-T5, designado como F_7 , F_8 e F_9 .

$$d_2 = d_1 - 0,15d_1 \quad (11)$$

$$d_3 = d_2 - 0,15d_2 \quad (12)$$

O valor de 15% do diâmetro de impressão d_1 e d_2 , utilizados nas equações (11) e (12) serve como meio de padronização para a determinação das demais forças, correlacionando os três materiais em uma única variável.

Com base na sequência metodológica discutida o primeiro resultado obtido foi a relação de carga normal aplicada para cada material, conforme tabela 2.

Tabela 2: Valores de carga aplicada

Parâmetro	Material	Símbolo	Força (N)	Diâmetro de impressão
CARGA APLICADA	AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L	F_1	100	0,7304
		F_2	72	0,5478
		F_3	52	0,4105
	AÇO CARBONO AISI 1020	F_4	62	0,7304
		F_5	44	0,5478
		F_6	32	0,4105

ALUMÍNIO 6063-T5	F ₇	35	0,7304
	F ₈	30	0,5478
	F ₉	25	0,4105

Fonte: Autoria Própria

A maior carga aplicada foi de 100 N para o aço inoxidável AISI 316L, uma vez que este é o material que possui a maior dureza entre os utilizados, e a menor utilizada foi a carga de 25 N para o alumínio 6063-T5, considerando que o mesmo tem a menor dureza entre os materiais. Já o Aço Carbono AISI 1020 detém os valores intermediários de carga aplicada, uma vez que sua dureza é maior que a do alumínio 6063-T5, porém menor que a do aço inoxidável.

Pode-se perceber que a força 3 utilizada no aço inoxidável tem o valor de 52N, tal valor está na faixa intermediária da Força 4 e força 5 (Aço Carbono AISI 1020), e a força 6, tem valor intermediário as forças 7 e 8 (Alumínio 6063-T5).

3.4 ENSAIO DE DESLIZAMENTO

O ensaio de deslizamento foi realizado com o corpo-de-prova usinado e sem nenhuma irregularidade em sua face usinada, ou seja, livre de oxidação, batidas, ou até mesmo poros ou impurezas. Foram realizados ensaios em três corpos-de-prova, um para cada tipo de material.

A partir dos valores de carga calculados por meio da equação (10), cada corpo de prova foi submetido a atuação do tribômetro “CETR” , onde primeiramente a amostra foi posicionada no mesmo e determinou-se a utilização da esfera de carbeto de tungstênio (WC-Co) de diâmetro de 4 mm, além das variáveis na interface do tribômetro, como a velocidade de deslocamento (0,17 mm \ s), uma pré-carga de 10N, o comprimento da trilha (5mm) e o espaçamento entre as trilhas (2,5 mm) realizando três pistas por carga, conforme Figura 16, após isso, com ajuda do *software UMT Test Viewer*, uma vez que, o corpo de prova foi submetido ao riscamento. O *software* realiza a análise dos parâmetros do risco simultaneamente obtendo assim, valores de coeficiente de atrito. Esses valores são encontrados a partir da média dos valores dos coeficientes em todo o percurso realizado pelo *software*, conforme Figura 15, onde foram considerados todos os pontos no caminho do mesmo.

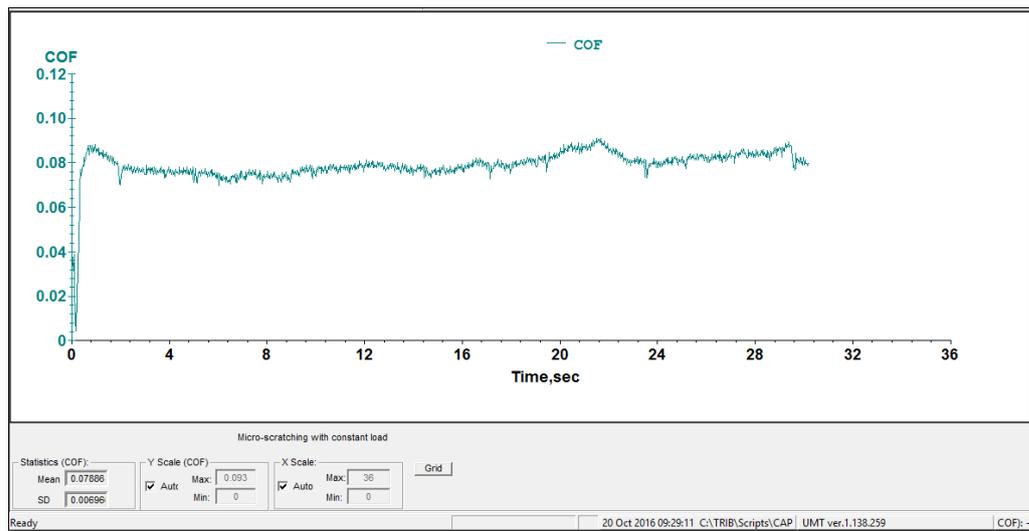


Figura 15 - Coeficiente de atrito médio no Aço carbono AISI 1020 ao longo de todo trajeto, utilizando uma carga normal aplicada de 32 N.

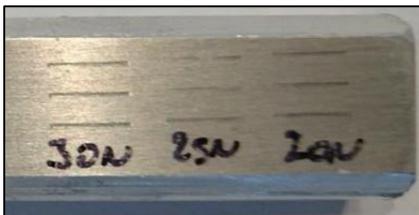


Figura 16 - Trilhas após ensaios de deslizamento
Fonte: Autoria Própria

Posteriormente, as amostras foram enviadas ao ensaio de interferometria, para determinação do perfil de impressão obtido, fornecendo os valores necessários (s, h, c, a), conforme Figura 10.

3.5 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES LATERAIS POR INTERFEROMETRIA ÓPTICA

A formação de bordas foi avaliada via análise interferométrica. Após a realização do ensaio de deslizamento, foi feita a medição do perfil através do interferômetro Taylor Hobson com auxílio do software Talysurf. Para a realização do ensaio de interferometria, foram utilizados três corpos-de-prova, no qual os mesmos foram ensaiados nove vezes cada, devido a quantidade de riscos (nove, sendo três riscos por força) em cada um. Foi determinado como área útil de

ensaio a região central de cada risco, conforme figura 16, já que a força aplicada no ensaio de deslizamento, encontra-se mais uniforme ao centro do comprimento do mesmo, inibindo a divergência entre as medidas ou a leitura de informações mascaradas.

O objetivo principal da realização do ensaio é determinar a altura da borda bem como a profundidade de endentação do diâmetro de impressão, proporcionando o valor da razão altura sobre profundidade. Para a completa realização do ensaio foram considerados os parâmetros a seguir:

- Área útil de medição: 3,0 X 3,0 mm;
- Espaçamento entre os locais de medição 2,5 μm ;
- Medição com luz Branca (resolução de 10 nm);
- Medição com o risco alinhado, fazendo a centralização do mesmo.

O ensaio de interferometria óptica foi realizado com influência de uma temperatura e umidade conhecida e determinada. O local da realização do ensaio, manteve-se com a temperatura de $(20 \pm 2)^\circ \text{C}$, com umidade de 50 % a 70 %, valores no qual estão dentro do especificado pelo fabricante do interferômetro.

Com ajuda do Software TALYSURF, pode-se determinar o perfil de impressão de cada risco, conforme anexo B, observando se houve bordas ou retração, retirando os parâmetros “s (altura da borda)” e “h (profundidade da endentação)”.

Vale ressaltar que o comprimento da trilha detém $X=5\text{mm}$, porém, a medida foi realizada em $X=2,5\text{mm}$, conforme figura 17. O interferômetro realiza uma seção na amostra, conforme figura 18. Além disso, foi desconsiderando o tangenciamento (figura 10) para fins de simplificação na obtenção dos resultados.

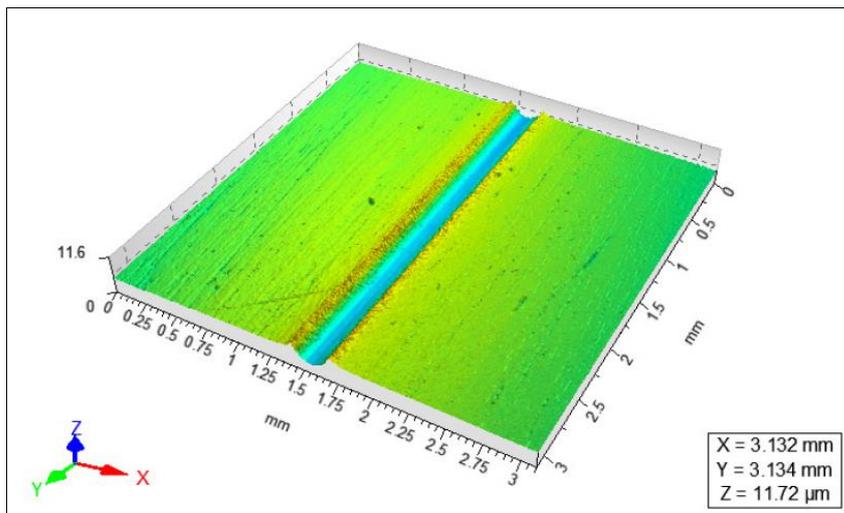


Figura 17 - Vista da região útil utilizada para a verificação dos parâmetros “s” e “h”.

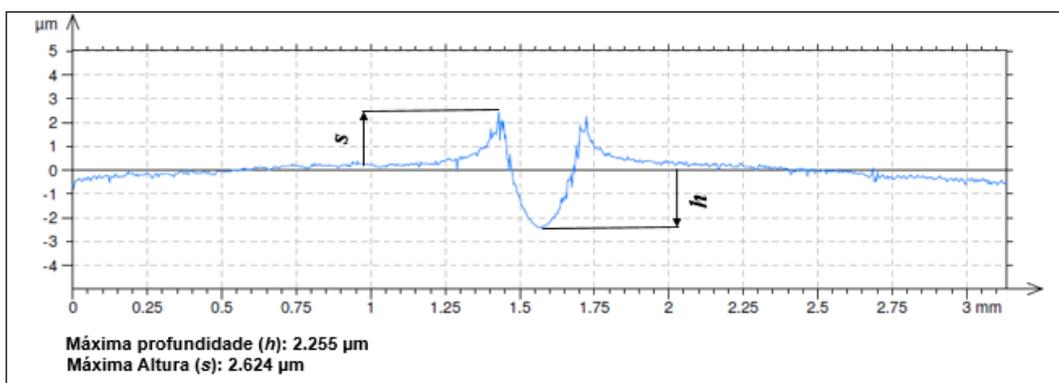


Figura 18 - Perfil de impressão Aço carbono AISI 1020

A utilização da relação “s/h” é útil e necessária para encontrar o coeficiente de encruamento do material a partir de modelos matemáticos pré-estabelecidos e conhecidos, como por exemplo pela equação de Matthews, Hill et al, Taljat et al, Alcalá et al, encontrados no trabalho do Cipriano 2008, no qual as equações dos modelos acima citados, são para modelos estáticos, se diferenciando do presente trabalho uma vez que o mesmo leva em consideração a componente tangencial atuante.

Convém caracterizar a importância atribuída a relação “s/h” nesta avaliação levando em consideração a comparação do comportamento dos resultados dos materiais com atuação da componente tangencial, com o comportamento da relação dos materiais com endentação esférica de maneira estática, verificando se segue uma lógica, ou há a mudança de comportamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de deslizamento e interferometria, além de valores necessários para a aplicação de tais ensaios, com intenção de determinar a razão s/h cinética.

4.1 COEFICIENTE DE ATRITO

Antes de mostrar os resultados do coeficiente de atrito considera-se a influência da força tangencial. Assim, os resultados obtidos para a força tangencial são explanados na figura 19(a) para o aço Carbono AISI 1020 e Inoxidável AISI 316L, se diferenciando do comportamento do alumínio, figura 19(b)

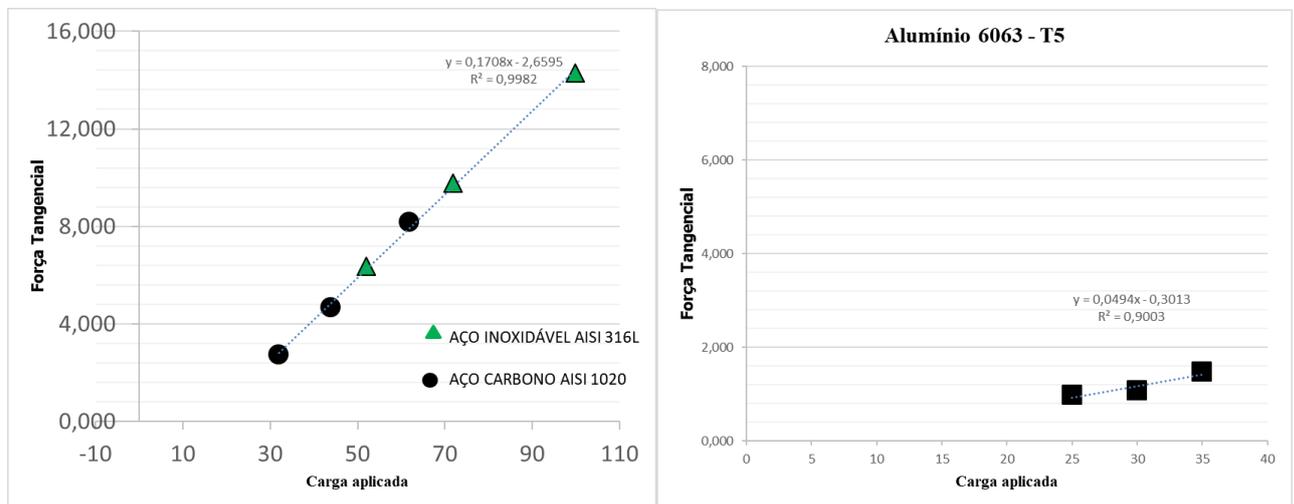


Figura 19 - Força tangencial versus carga aplicada- (a) Aço carbono AISI 1020 e Aço inoxidável AISI 316L – (b)- Alumínio 6063- T5

Onde pode-se perceber que a curva da figura 19 (a) segue um comportamento linear, ou seja, quanto menor a força normal aplicada, independente do material, menor será a força tangencial que irá atuar na face do corpo de prova. Já a figura 19 (b) mostra um comportamento diferente da curva da figura 19 (a). O alumínio por ser um material com dureza menos elevada, e assim não proporciona um comportamento linear, tal efeito aparece devido a possíveis interferências ao longo do deslizamento, como por exemplo, quando acontece o empilhamento de material, tal volume pode se deparar com uma discordância mais resistente e com isso é necessário o aumento da força tangencial para transpor essa barreira. É também perceptível, que a disparidade e proporção entre os materiais cresce, como por exemplo, o alumínio em relação ao aço carbono, em que a proporção de crescimento da força tangencial é maior entre as duas primeiras forças aplicadas do que entre as forças de 25 N e 30 N do alumínio, e a proporção é ainda maior em relação a terceira força. Isso ocorre de forma análoga para o aço

inoxidável em relação aos outros dois materiais. Essa divergência entre o comportamento das forças tangenciais está ligada à dureza do material, ou seja, quanto maior sua dureza, mais divergente será a força tangencial em relação a força normal.

O resultado do coeficiente de atrito está intrinsicamente ligado com a força tangencial. A seguir, tabela 3, são apresentados os resultados médios de coeficiente de atrito obtidos em deslizamento.

Tabela 3 – Resultados médios do coeficiente de atrito pelo ensaio de deslizamento

Parâmetro	Símbolo	Material	Carga	Risco			Média	Desvio Padrão
				1	2	3		
COEFICIENTE DE ATRITO	μ	AÇO	32	0,0930	0,0767	0,0825	0,0841	0,0083
		CARBONO	44	0,1075	0,1067	0,0988	0,1043	0,0048
		AISI 1020	62	0,1174	0,1222	0,1492	0,1296	0,0171
		AÇO	52	0,1152	0,1252	0,1262	0,1222	0,0061
		INOXIDÁVEL	72	0,1282	0,1389	0,1385	0,1352	0,0061
		AISI 316L	100	0,1362	0,1433	0,1472	0,1422	0,0056
		ALUMÍNIO	25	0,0477	0,0424	0,0434	0,0445	0,0028
		6063-T5	30	0,0462	0,0487	0,0546	0,0498	0,0043
			35	0,0504	0,0483	0,0443	0,0477	0,0031

Fonte: Autoria Própria

Pelos valores obtidos no tabela 3, pôde-se perceber que o aumento da força gera um aumento no coeficiente de atrito, em suma, detêm uma relação proporcional.

Pode -se perceber que o aço inoxidável AISI 316L e o aço carbono AISI 1020 são substancialmente parecidos, se divergindo em escala de milésimos, pois a deformação plástica causada no aço inoxidável é maior que no aço carbono devido a dureza do mesmo ter valor maior que a do aço carbono, acarretando em uma maior dificuldade em transpor barreiras, no caso “empurrar “material, e assim exibindo um coeficiente de atrito maior.

O coeficiente de atrito μ varia efetivamente devido a ação das forças aplicadas bem como da componente tangencial. No presente trabalho, a adição de uma componente tangencial ao sistema formado implica na componente da aceleração vetorial direcionada ao sentido do vetor velocidade, proporcionando uma aglomeração de material na direção da força ao longo do ensaio, com isso a formação de bordas fica ainda mais evidente ao levar em consideração tal efeito, fazendo com que o coeficiente de atrito seja maior em materiais com dureza mais elevada e aplicação de intensidades de forças também maiores. Além disso, vale ressaltar que a área de contato não foi tão relevante para a nossa análise, uma vez que é muito pequena e a variação do coeficiente de atrito independe da área de contato aparente, mas sim da área de contato efetiva que é muito menor do que a área de contato aparente, já que os dois corpos se

tocam em alguns pontos dessa área. A intensidade da força de atrito, que está diretamente ligada ao coeficiente de atrito, depende do máximo de número de pontos de contato entre a esfera de endentação e a amostra, ou seja, depende da área efetiva. Porém, pode-se considerar que a área efetiva depende proporcionalmente da carga aplicada ao ensaio, dizendo em outras palavras, a área efetiva aumenta conforme aumenta-se a carga aplicada, conseqüentemente a um aumento no coeficiente de atrito.

Além do mais, vale destacar que o coeficiente de atrito não é uma propriedade do material, mas sim uma resposta do sistema ao qual o material foi submetido. Isso é comprovado observando os resultados do quadro 2, utilizando a carga de 52N no aço inoxidável obteve-se um valor de coeficiente de atrito de 0,1222, tal valor se encontra entre os valores de carga aplicada de 44N e 62N no Aço 1020 com valor de atrito de 0,1296, os quais demonstram uma pequena divergência de resultados.

Cabe salientar, que na maioria das amostras, a média do coeficiente de atrito é semelhante ao valor do coeficiente do segundo risco, isso acontece devido ao risco ser realizado bem ao centro da amostra, região onde os contornos de grão estão bem definidos caracterizando uma melhor visualização e análise dos resultados, já que as discordâncias são menores de modo que a quantidade de contornos de grãos fossem baixas.

4.2 DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES LATERAIS

4.2.1 RELAÇÃO s/h

A relação s/h é influenciada diretamente pela ação da força tangencial uma vez que a mesma acarreta aglomeração e arrancamento de material proporcionando o surgimento de alturas de bordas elevadas, e maiores profundidades da endentação.

Para análise dos dados “s” e “h”, utilizou-se do entendimento da Figura 18, onde no eixo das abscissas (x) configura a largura do campo de trabalho utilizado para verificação do risco (3mm), já o eixo das ordenadas (y), configura o tamanho do vale e do pico da nova formação do diâmetro da endentação, onde a altura positiva denominada borda é caracterizada por “s”, e a profundidade máxima da endentação esférica é caracterizada por “h”. Além disso,

vale ressaltar que a figura foi obtida no meio da trilha de 5mm, ou seja, foi determinada exatamente em 2,5mm, seccionando a trilha.

Os resultados de “*s*” e “*h*” obtidos através dos gráficos do anexo B. Consequentemente, foram obtidas as razões “*s/h*” para 3 corpos ensaiados com suas respectivas cargas, conforme citado anteriormente.

A figura 20 demonstra as morfologias de impressão obtidas a partir da amostra do Aço Inoxidável AISI 316L com forças de 52 N, 72N e 100N.

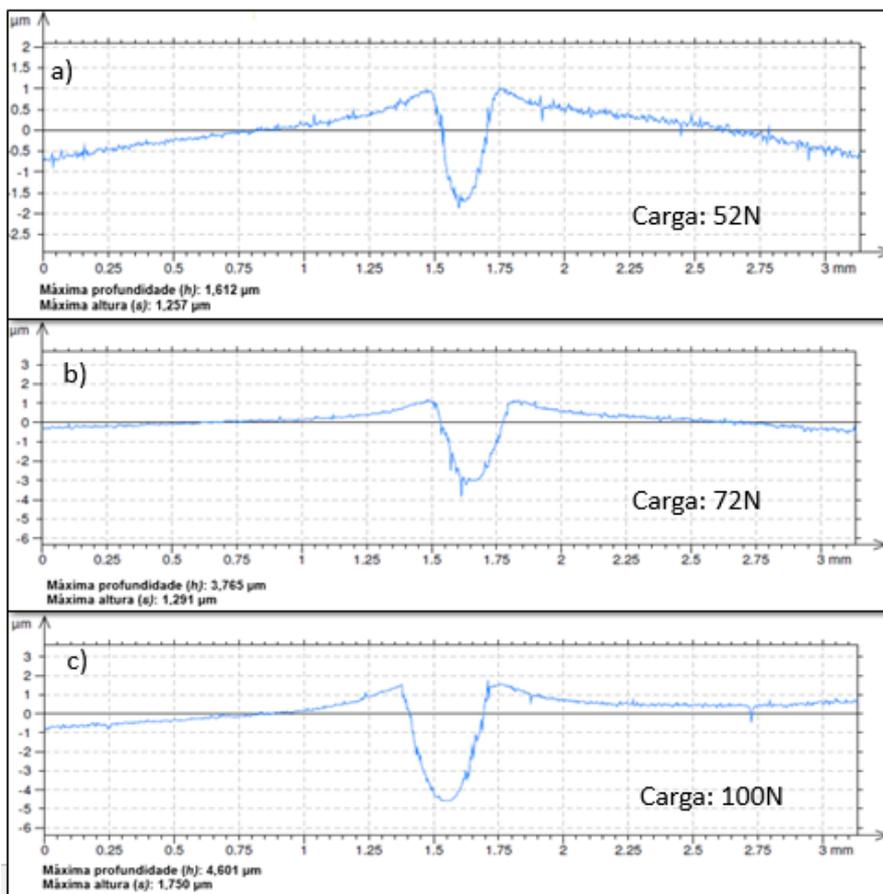


Figura 200 - Morfologias de impressão da amostra Aço Inoxidável AISI 316L com (a)carga de 52N, (b) carga de 72N, (c) carga de 100N

A figura 21 demonstra as morfologias de impressão obtidas a partir da amostra do Aço carbono AISI 1020 com forças de 32 N, 44N e 62N.

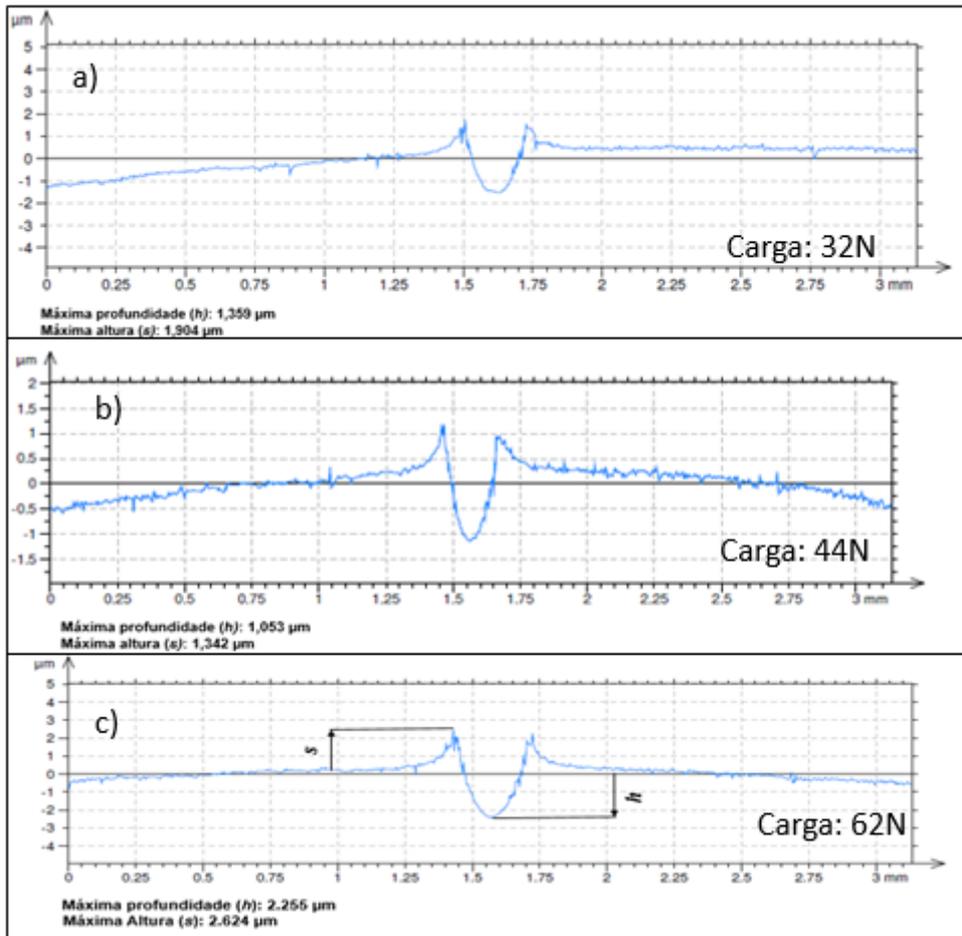


Figura 211 - Morfologias de impressão da amostra Aço Carbono AISI 1020 com (a)carga de 32N, (b) carga de 44N, (c) carga de 62N.

A figura 22 demonstra as morfologias de impressão obtidas a partir da amostra do Alumínio 6360 - T5 com forças de 25 N, 30N e 35N.

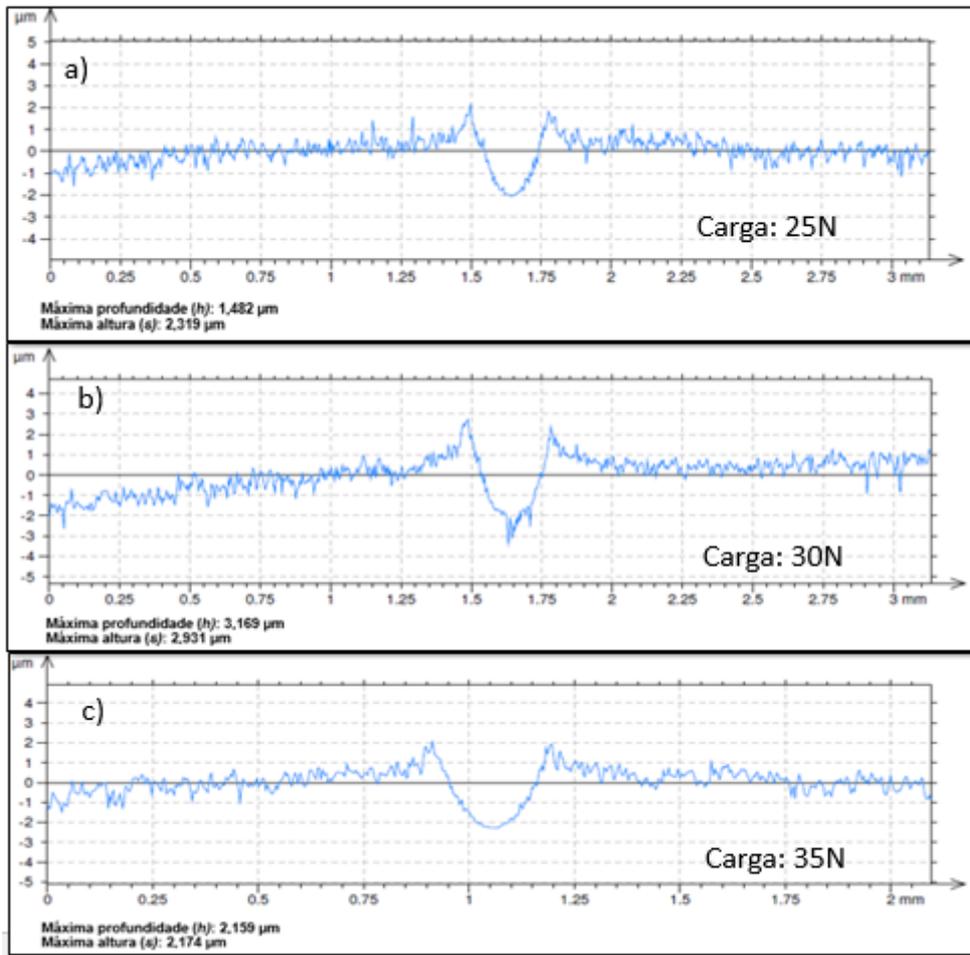


Figura 22 - Morfologias de impressão da amostra Alumínio 6360 T-5 com (a) carga de 25N, (b) carga de 30N, (c) carga de 35N.

As morfologias de impressão obtidas da amostra do aço inoxidável, aço carbono 1020 e alumínio, proporcionam uma análise qualitativa e quantitativa em relação a formação de borda ou retração. Pode-se perceber que mesmo variando a carga aplicada há somente a formação de bordas. Tal comportamento de formação de bordas indica que houve a predominância do mecanismo de deformação plástica, e assim o valor do parâmetro “s”, que indica o tamanho da borda ou retração se encontra maior que zero.

Tabela 4: Resultados médios do ensaio de determinação do perfil de impressão

Parâmetro	Origem	Alumínio 6063 - T5			Aço carbono AISI 1020			Aço Inoxidável AISI 316L		
		Carga (N)			Carga (N)			Carga (N)		
		25	30	35	32	44	62	52	72	100
Razão s/h	Experimental	1,258	1,057	1,019	1,389	1,304	1,283	0,569	0,467	0,579
	Cipriano, 2008	0,087			0,19			-0,039		

Com os resultados obtidos a partir da morfologia de impressão fica evidente a variação de resultados entre o Aço inoxidável AISI 316L e os demais materiais, uma vez que esse parâmetro é totalmente ligado ao coeficiente de encruamento (PINTAUDE, Giuseppe; HOECHELE, Alessandro Roberto). Conforme Cipriano 2008 (tabela 4), o material que mais divergiu no coeficiente de encruamento em relação aos demais foi o Aço inoxidável AISI 316L, enquanto o Aço 1020 e o alumínio detiveram o coeficiente de encruamento relativamente próximo. Logo, essa relação de disparidade se assemelha aos resultados obtidos neste trabalho, tabela 4, onde a relação s/h é maior para o aço carbono AISI 1020, seguido pelo alumínio 6063-T5 e por fim e com o menor valor na relação o aço inoxidável AISI 316L.

Cipriano 2008, revelou que a relação s/h é inversamente proporcional ao encruamento, ou seja, quanto maior s/h menor n . Logo, de acordo com a relação s/h obtida, nota-se que a razão s/h do alumínio e do aço 1020 são aproximadas, gerando conseqüentemente um coeficiente de encruamento relativamente pequeno para ambos. Já o aço inoxidável detém uma relação oposta aos outros materiais, em outras palavras, sua relação s/h é menor, por conseqüência de ter um coeficiente de encruamento maior.

Pode-se notar que o parâmetro s/h foi gradualmente diminuindo com o aumento da carga aplicado, de acordo com o tabela 4, devido a ação da força tangencial, que influenciou no deslizamento de material e conseqüente aglomeração do mesmo, gerando bordas com proporção a profundidade maiores para forças menores, pois há a dificuldade de “empurrar” material quando aplicado uma força menor, proporcionando o empilhamento de material caracterizando o aparecimento de bordas maiores. Já com a força maior, há uma facilidade em “empurrar” material, logo a altura das bordas é menor, proporcionando a relação “ s/h ” menor.

Percebe-se que, a disparidade de resultados, da razão s/h , é muito grande entre os resultados experimentais e os obtidos por Cipriano 2008, tabela 4. Contudo deve-se levar em conta que as cargas aplicadas por Cipriano, no ensaio de dureza, para obter o perfil de impressão são pelo menos 10 vezes maiores do que as utilizadas nesse trabalho, porém a variável que mais

influência a divergência entre os resultados é o uso da componente tangencial no presente trabalho, pois é notório o aumento das bordas ao ser realizado o deslizamento do material, proporcionando a extinção de retração nos corpos de prova utilizados.

4.2.2 RELAÇÃO E/H

Com a utilização da Equação 8, e com posse das variáveis E e H do material pode-se obter a relação h_c/h de cada material utilizado, conforme figura 23. Já a relação h_c/h para cada força, quadro 5, foi obtida através do anexo B - Perfil de impressão dos corpos de prova do ensaio de deslizamento.

Tabela 5- Resultados da relação h_c/h em relação a E/H

Parâmetro	Origem	Alumínio 6063 - T5			Aço carbono AISI 1020			Aço Inoxidável AISI 316L		
		Carga (N)			Carga (N)			Carga (N)		
		25	30	35	32	44	62	62	72	100
Razão h_c/h	Experimental	2,16400	2,02800	2,24433	2,75033	2,45900	2,28300	1,59433	1,48867	1,54533
	Referência (E e H)	1,65000			1,93000			1,71000		
	Desvio Padrão	0,54709	0,09296	0,40160	0,33369	0,13379	0,21744	0,17339	0,15861	0,15134

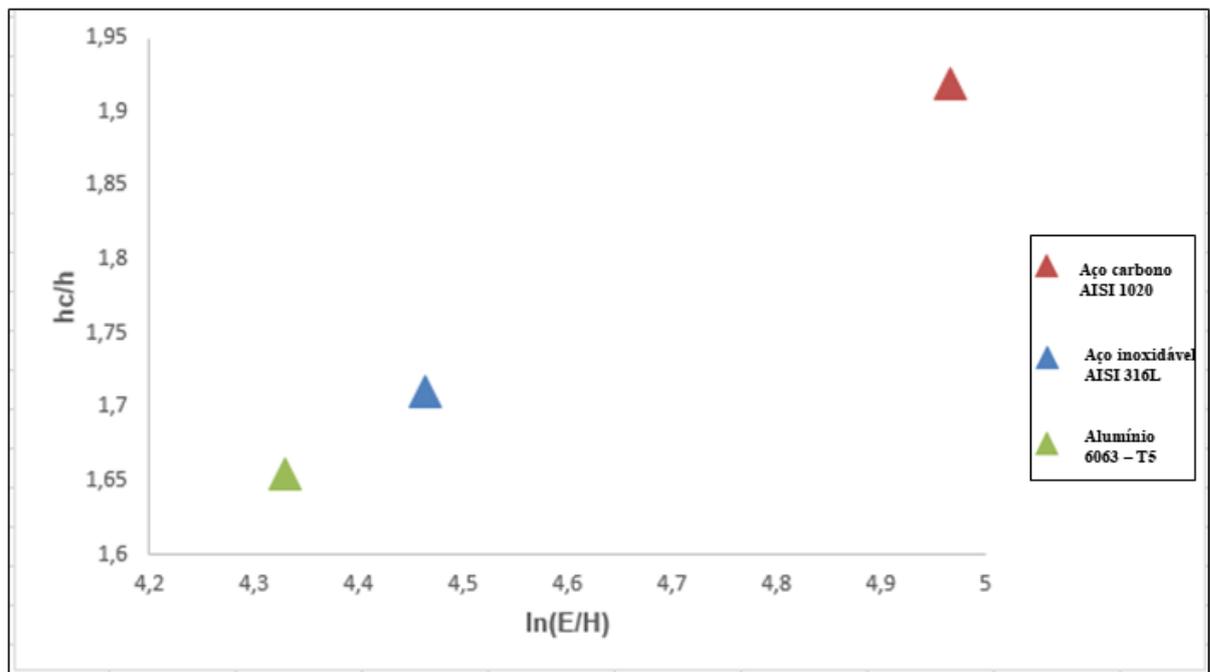


Figura 23 - Valores de $\ln(E/H)$ versus h_c/h , levando em consideração apenas as propriedades E e H.

Convém a comparação entre os dados da Figura 23 e da tabela 5. A tabela 5 utiliza os valores de h_c/h para cada força aplicada e em seu respectivo material, já a figura 23 demonstra os valores de h_c/h para cada material, já que o cálculo de h_c/h , independe da ação das forças, levando em consideração o valor de E e H de cada material, pode-se encontrar três valores de referência para h_c/h , com isso uma análise dos resultados encontrados a partir de um ensaio estático e cinético é realizada, onde o alumínio, por exemplo apresenta um valor da relação h_c/h de 1,65, e posteriormente observando o tabela 5 pode-se perceber que a relação h_c/h para o alumínio com força aplicada de 25N teve um valor de 2,164, para a força de 30N um valor de 2,028, e por fim para a força de 35N um valor de 2,244, tais valores um pouco divergentes em relação aos valores obtidos utilizando a equação 8 (figura 23), porém ao analisar o desvio padrão de respectivos valores e descontando estes desvios padrão nos dados do tabela 5, os resultados são valores bem próximos, ou seja, por exemplo, utilizando o valor do tabela 5 de 2,164 para força de 25 N, subtraindo seu desvio padrão de 0,54709 obtém um valor de 1,6169, valor bem próximo de 1,65 que é o resultado ótimo levando em consideração as propriedades E e H do material. Esta analogia pode ser observada para as demais forças e materiais, ajustando o valor a partir do desvio padrão consegue-se um resultado aproximado ao da figura 23.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho estudou-se a determinação da razão s/h cineticamente, que está intimamente ligada com o coeficiente de encruamento cinético, através do ensaio de deslizamento em três corpos-de-prova, alumínio 6063-T5, aço carbono AISI 1020 e aço inoxidável AISI 316L, com o intuito de comparar a similaridade destes resultados com o estudo estático realizado por Cipriano, 2008. À partir desses resultados pode-se enumerar as seguintes conclusões:

- Com a utilização da componente tangencial, houve um aparecimento acentuado de bordas em comparação ao ensaio de dureza estático, isso devido ao deslizamento, “empurrando” material na mesma direção e sentido da força tangencial.
- O aparecimento de bordas em todos materiais ensaiados corrobora com a literatura, uma vez que os valores de s/h dos dados experimentais deram, em todos os casos, maiores que 1, resultado lógico para a formação de bordas.
- A relação s/h obtida experimentalmente é bem divergente dos resultados obtidos de maneira estática, porém o comportamento dos materiais, levando em consideração os valores de s/h de Cipriano 2008, foram análogos, ou seja, tendem a seguir um padrão indiferente da atuação da força tangencial ou apenas da normal.
- A relação hc/h está amarrada à relação E/H , uma vez que são razões proporcionais, em que com o aumento do valor de E/H , há um aumento na relação hc/h .

REFERÊNCIAS

- ASTM E646. **Standard Test Methods for Tensile Strain-Hardening Exponents (n Values) of Metallic Sheet**. USA: American Society for Testing and Materials, 1998.
- ALBERTAZZI, G. JR, MATIAS R.V, ANALUCIA V.F, MIGGIORIN R.M. **Medição da forma de cilindros internos e externos com interferometria de luz branca**. “Congresso internacional de metrologia mecânica. 2008.
- ALCALÁ, J.; BARONE, A. C.; ANGLADA, M. **The Influence of Plastic Hardening on Surface Deformation Modes Around Vickers and Spherical Indents**. Acta Materialia, 2000.
- BALOTIN, J. G. **Procedimento para ensaio de materiais de atrito utilizando um tribômetro**. Porto Alegre, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BOESCH, P. R., MARTINS, V.; SCHAEFFER L. **Determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio de compressão do anel: uma revisão**. Revista Thema 2011.
- BOLSHAKOV, A., PHARR, G. M. **Influences of pileup on the measurement of mechanical properties by load and depth sensing indentation techniques**. Journal of Materials Research, Vol. 13 (4), 1998.
- CAHOON, J. R., BROUGHTON, W. H., KUTZAK, A. R. **The determination of yield strength from hardness measurements**. Metallurgical Transactions, volume 2.
- CALLISTER JR, WILLIAM D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Livros Técnicos e Científicos, 2002.
- CHENG, Y. T., CHENG, C. M. **What is indentation hardness?** Surface and Coatings Technologies, Vol. 133-134, 2000.
- CIPRIANO, G. L. **Determinação do coeficiente de encruamento de metais através da morfologia de impressões de dureza na escala macroscópica**, UTFPR, 2008.

DIETER, G. E. **Mechanical Behavior of Materials Under Tension**. University of Maryland, USA: Dean of Engineering, 1981

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecanica**. Tradução por Sousa e Silva A. S.; Almeida L. H.; Miranda P. E. V.; Rio de Janeiro.

DO VALE, João Luiz et al. **Comparison of scratch resistance of lamellar and compacted graphite irons used in cylinder liners**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 39, n. 10, p. 3981-3988, 2017.

HALLIDAY, R.K. **Fundamentos de física; Mecanica**. Ed. Itc Vol1- 8ªEd, 2003.

HILL, R., STÔRAKERS, B., ZDUNEK, A. B. **A theoretical study of the Brinell hardness test**. Proceedings of the Royal Society of London, volume A, nº 423, 1989.

HOECHELE, A.R. **Efeito da quantidade de trabalho a frio da liga de alumínio AA1350 no coeficiente de encruamento determinado por ensaios de dureza**. 2011.

HOLLOMON, J. H. **Tensile Deformation**. A.I.M.E. New York. Pag. 268 – 290, 1945

JARDRET V., ZAHOUANI H., LOUBET J.L., MATHIA T.G. **Understanding and Quantification of Elastic and Plastic Deformation during a Scratch Test**. Wear 1998; 218(1) 8-14.

JONES, R. & WYKES, C. (1989), **Holographic and Speckle Interferometry**, Second Edition. Cambridge University Press, Cambridge

JOST, H.P.,”**Tribology-origin and future** “, Wear, v.136, 1990

KUCHARSKI, S.; MRÓZ, Z. **Indentation of plastic hardening parameters of metals from spherical indentation tests**. Materials Science and Engineering A, nº318.

LOPES, W. **Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples**. Minas Gerais, 2009. Tese (Doutoramento em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais

MATTHEWS, J. R. **Indentation Hardness and Hot Pressing**. Acta Materialia, vol. 28, 1980.

NORBURY, A., SAMUEL, T. **The recovery and sinking-in or piling-up of material in the Brinell test, and the effect of these factors on the correlation of the Brinell with certain other hardness tests**. Journal of the Iron Steel Institute, 117, 1928.

OLIVEIRA, C. G.; SILVA, I.P.P. **Estudos tribológicos no estudo de engenharia mecânica**. Minas Gerais, 2015. Revista de Ensino de Engenharia, v. 34, n. 2, p. 3-10, 2015.

PINTAÚDE, G. **Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza**. São Paulo, 2002. Tese (Doutoramento em Engenharia de Materiais e Metalúrgica) – Universidade de São Paulo.

PINTAÚDE, GIUSEPPE; HOECHELE, ALESSANDRO ROBERTO. **Experimental analysis of indentation morphologies after spherical indentation**. Materials Research, v. 17, n. 1, p. 56-60, 2014

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**, John whiley & Sons, 1965.

SAMPAIO, M. A. B. **Mecânica do contato com método dos elementos de contorno para modelagem de máquinas tuneladoras**. São Paulo 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo.

SINATORA, A. **Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte**. São Paulo, 2005.

SMERDOVA, O., MAZUEYR D., and CAYER-BARRIOZ, J., 2014, “**Links Between Energy Dissipation and Wear Mechanisms in Solid Epoxy/Epoxy Sliding Contact**,” Tribol. Int., 77.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. Fundamentos teóricos e práticos. São Paulo, Edgard Blucher, 1982.

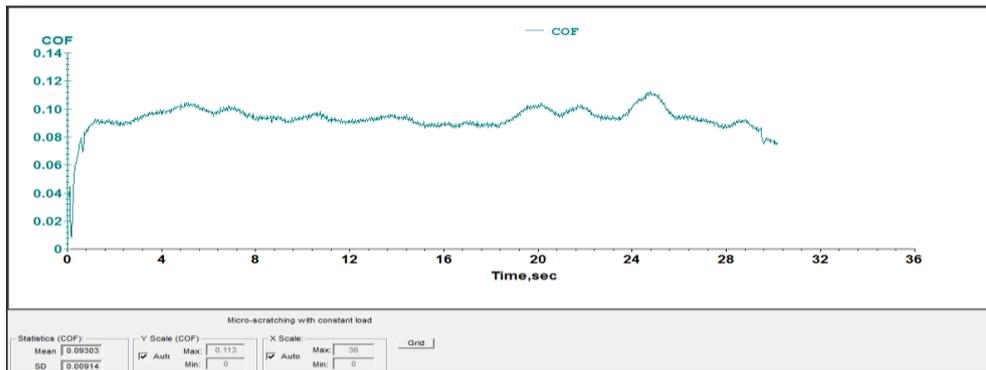
TABOR, D. **The Hardness of Metals**. Oxford: Clarendon, 1951.

TALJAT, B.; PHARR, G. M. **Development of pile-up during spherical indentation of elastic–plastic solids**. International Journal of Solids and Structures, n°41, 2004.

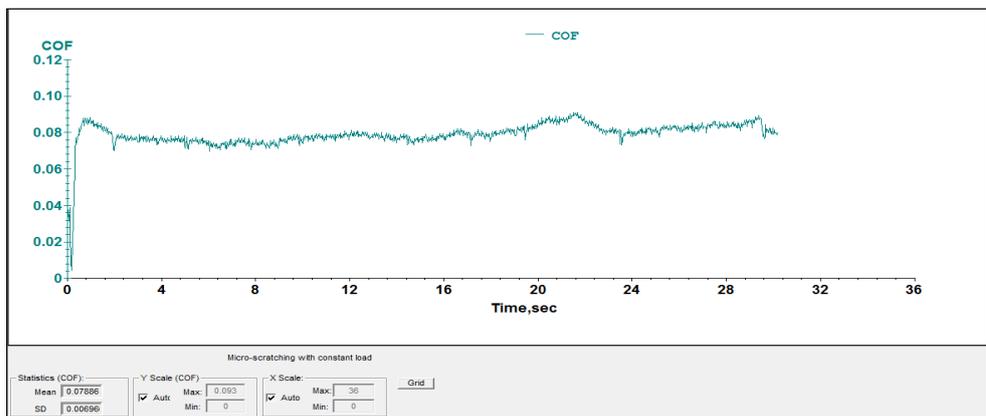
ZHANG,S.,ZHAO,B., KEER, M.LEON. **Spherical elastic-plastic contact model for Power-Law hardening materials under combined normal and tangential loads**. V.1. (2016)

ANEXO A – GRÁFICO DO COEFICIENTE DE ATRITO VERSUS TEMPO

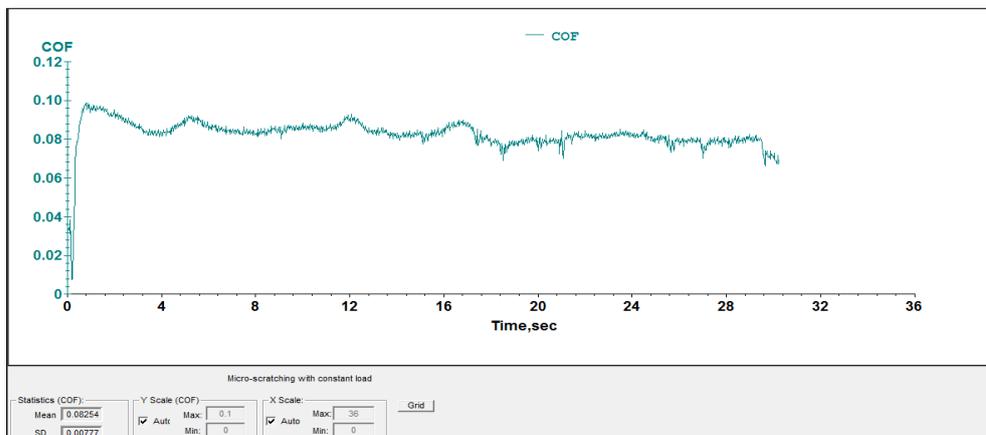
Risco nº1 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 32 N – D: 4mm



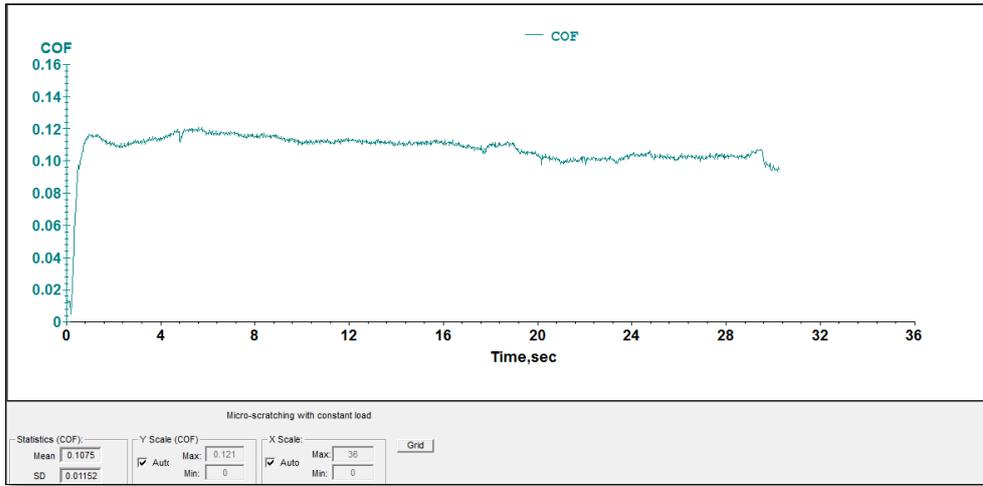
Risco nº2 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 32 N – D: 4mm



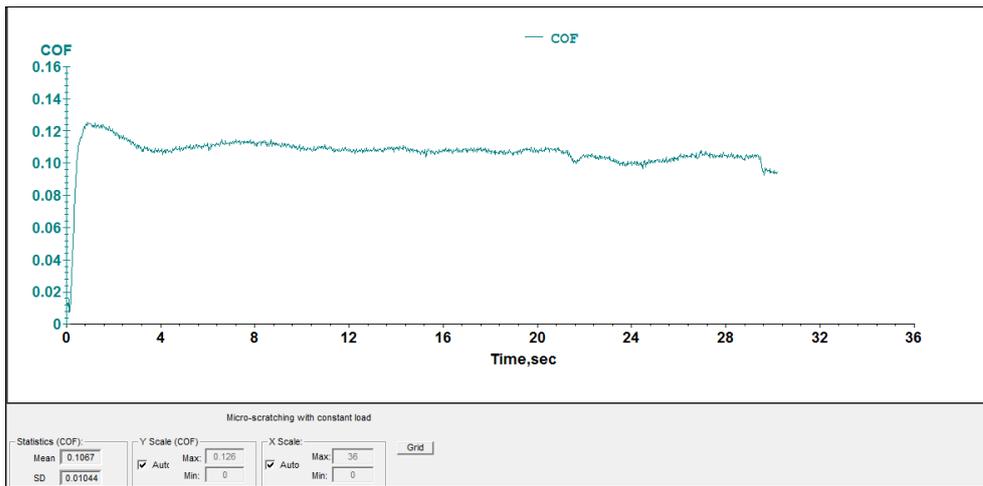
Risco nº3 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 32 N – D: 4mm



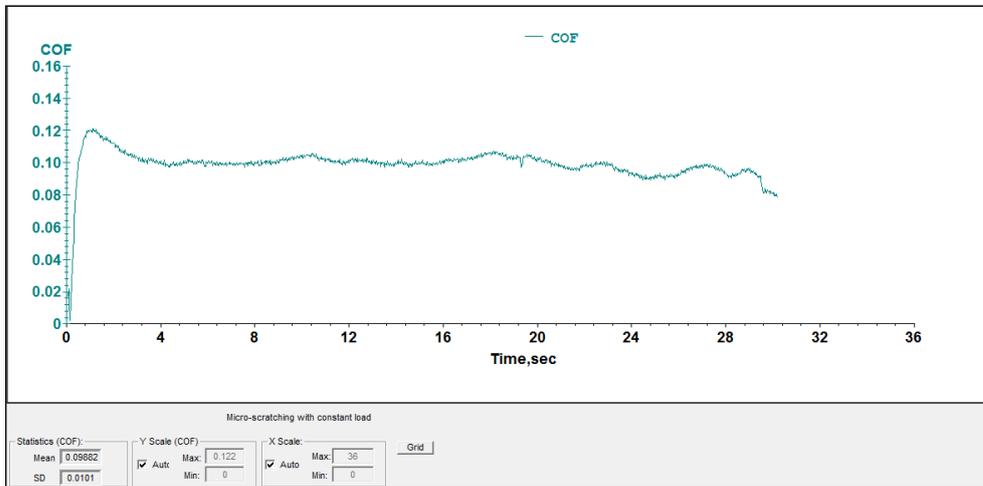
Risco nº1 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 44 N – D: 4mm



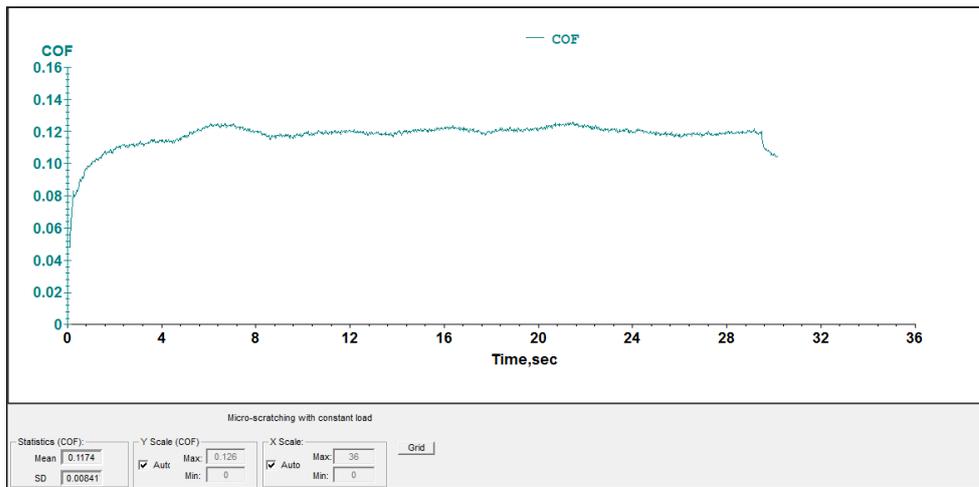
Risco nº2 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 44 N – D: 4mm



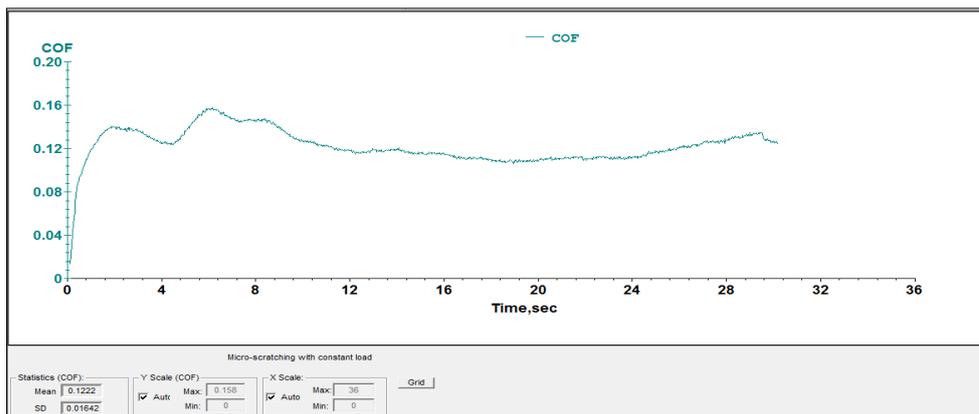
Risco nº3 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 44 N – D: 4mm



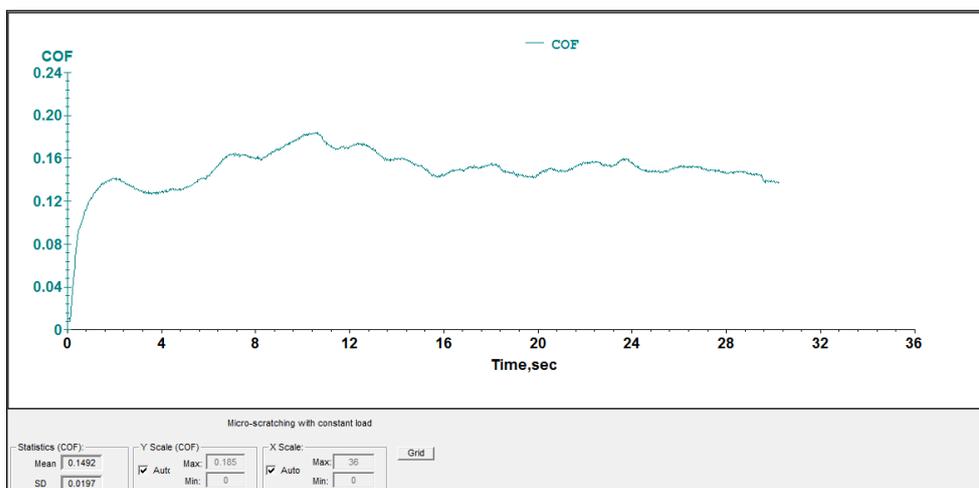
Risco nº1 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 62 N – D: 4mm



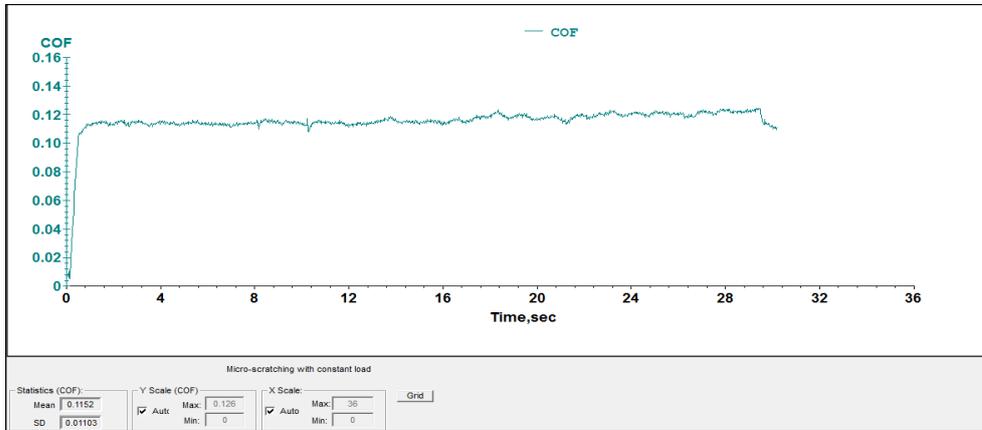
Risco nº2 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 62 N – D: 4mm



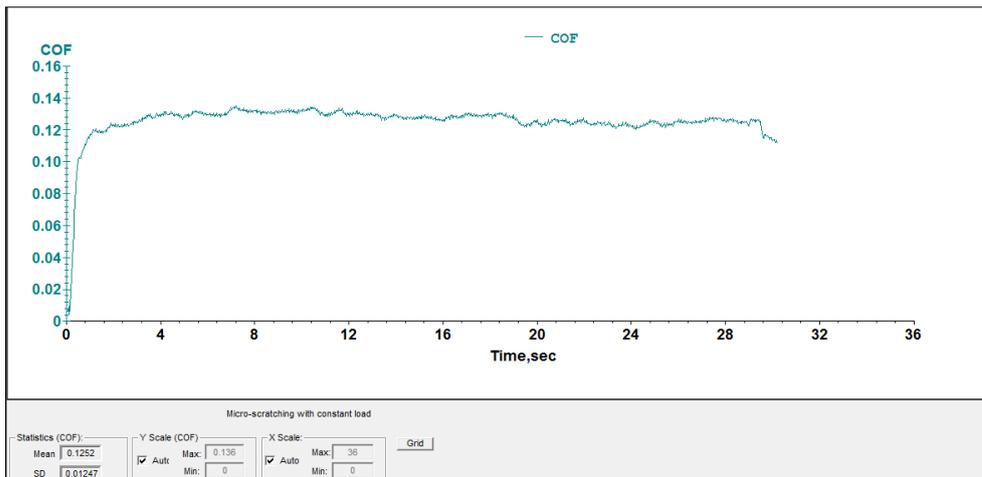
Risco nº3 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 62 N – D: 4mm



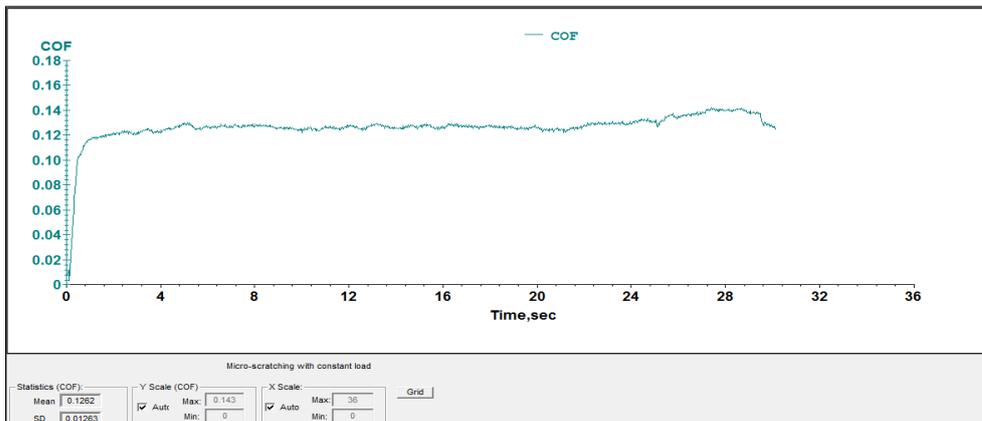
Risco nº1 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 52 N – D: 4mm



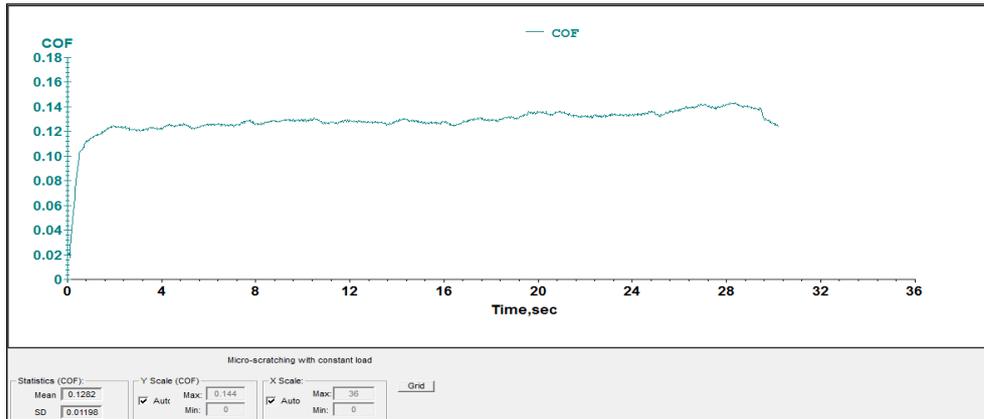
Risco nº2 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 52 N – D: 4mm



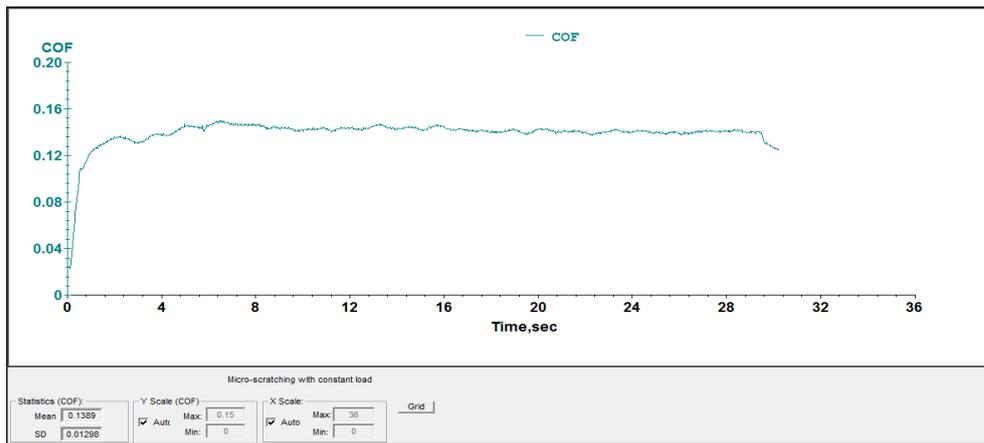
Risco nº3 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 52 N – D: 4mm



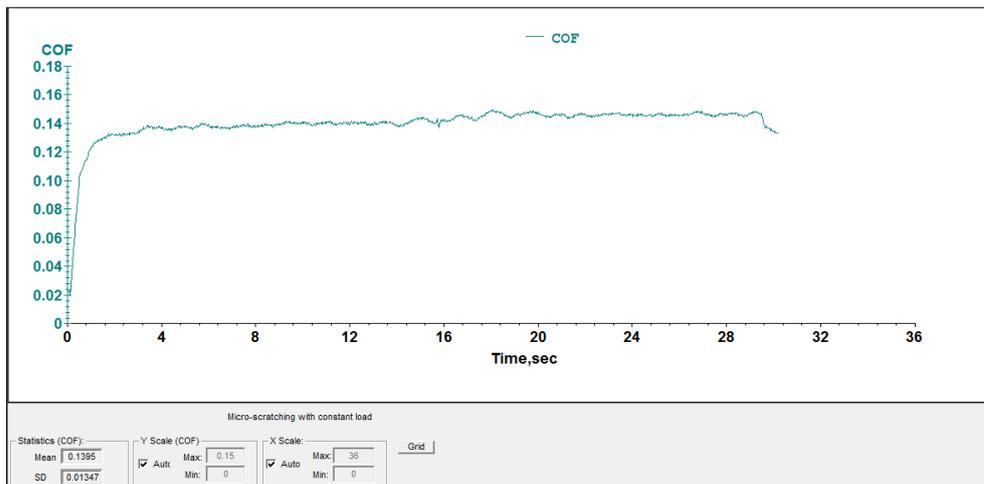
Risco nº1 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 72 N – D: 4mm



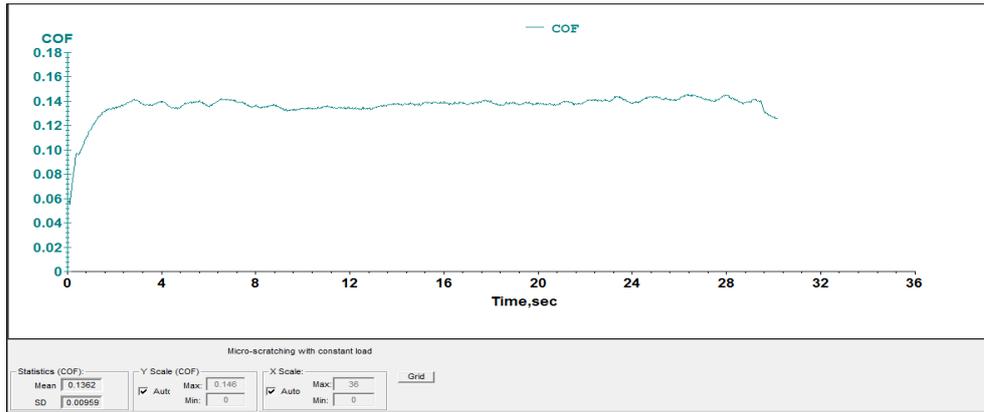
Risco nº2 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 72 N – D: 4mm



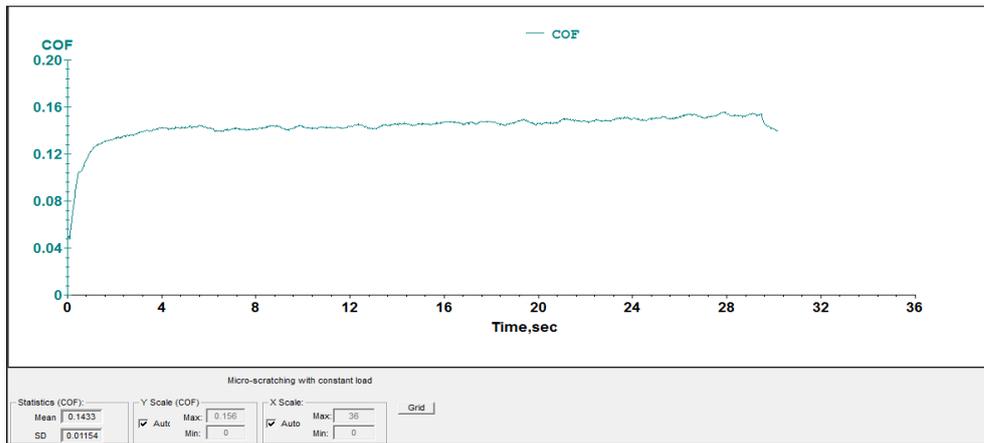
Risco nº3 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 72 N – D: 4mm



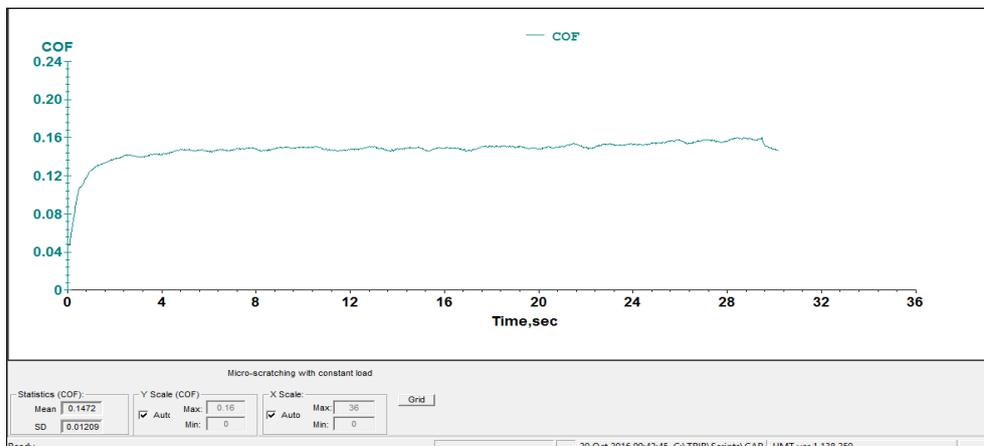
Risco nº1 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 100 N – D: 4mm



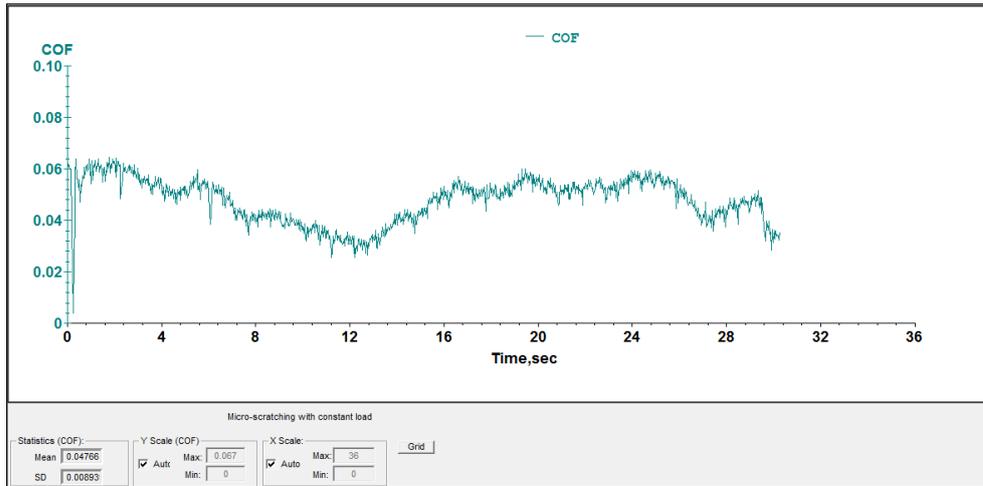
Risco nº2 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 100 N – D: 4mm



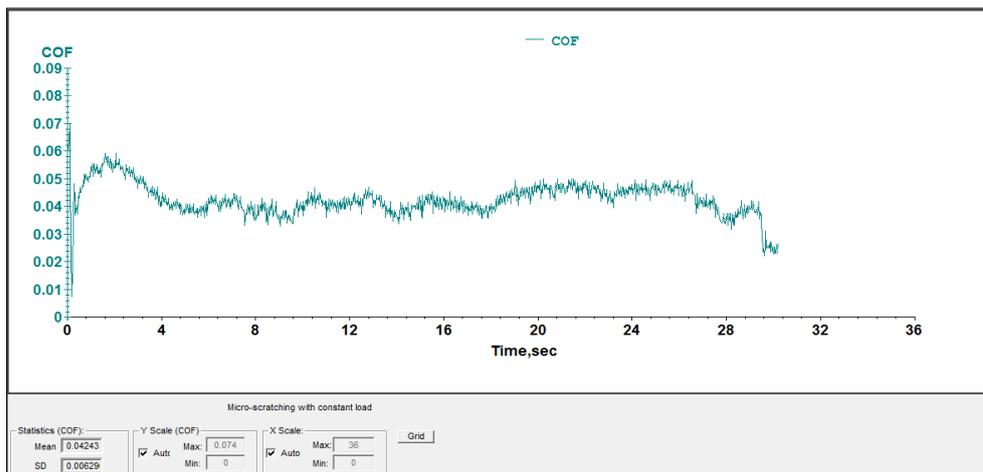
Risco nº3 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 100 N – D: 4mm



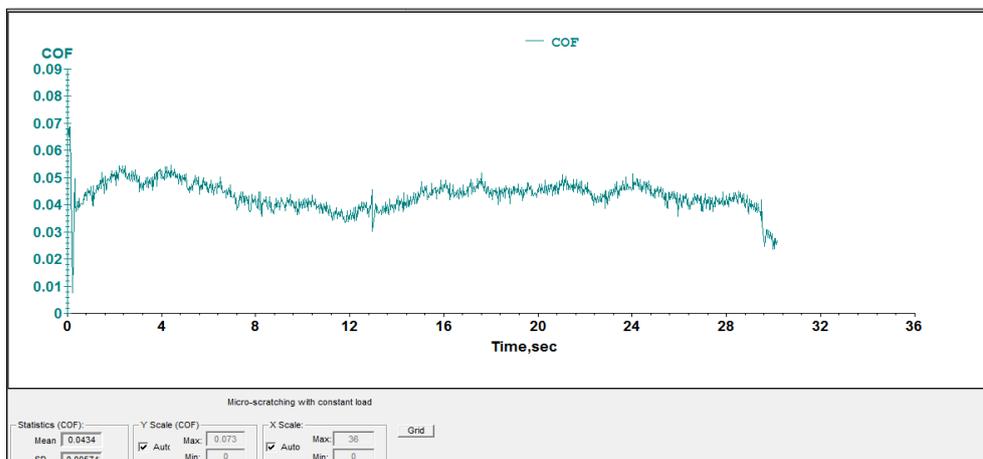
Risco nº1 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 25 N – D: 4mm



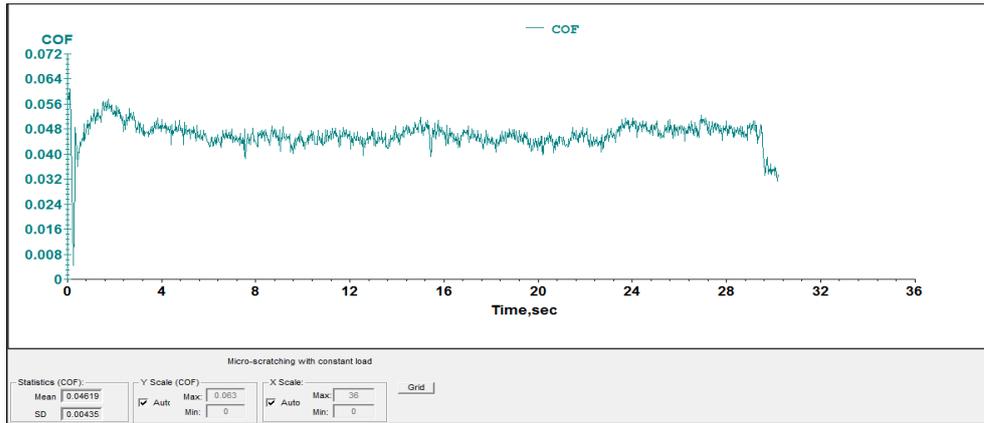
Risco nº2 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 25 N – D: 4mm



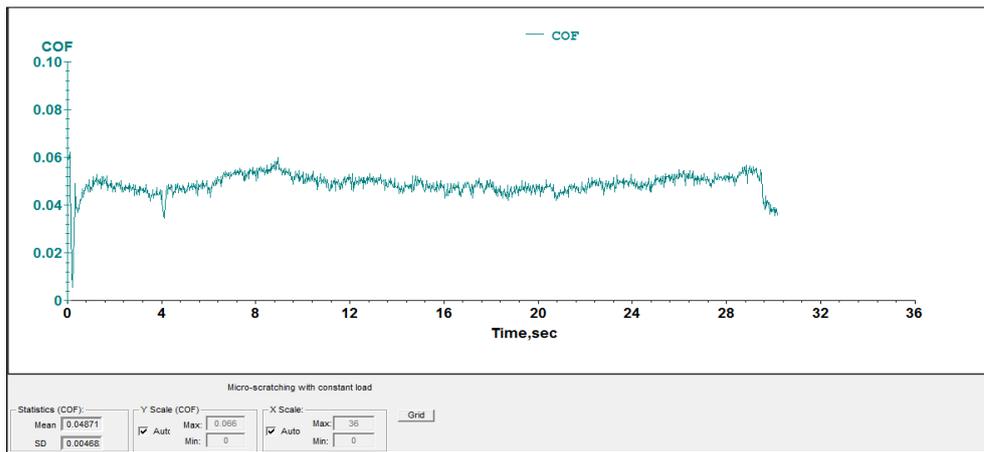
Risco nº1 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 25 N – D: 4mm



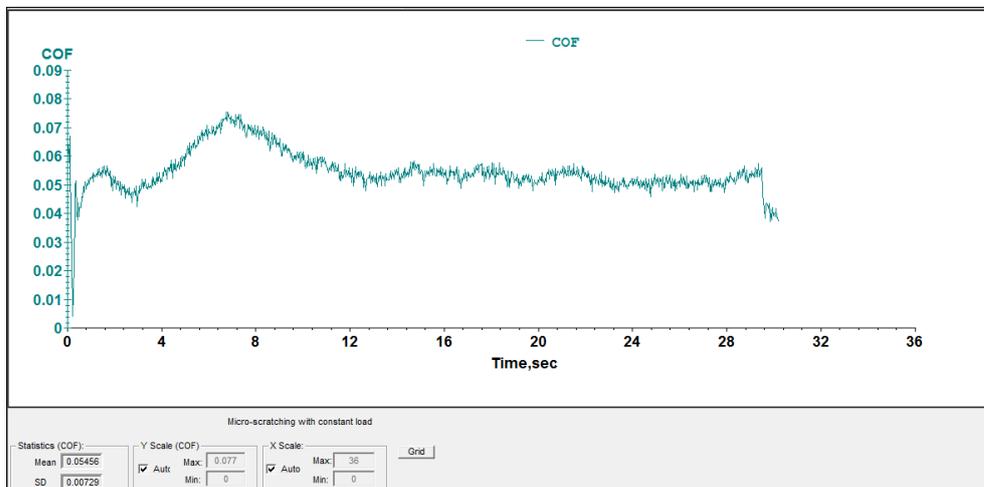
Risco nº1 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 30 N – D: 4mm



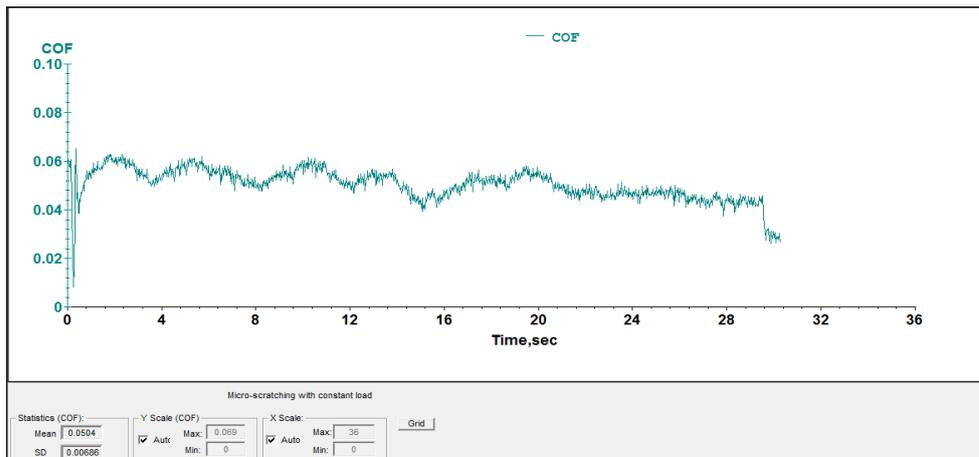
Risco nº2 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 30 N – D: 4mm



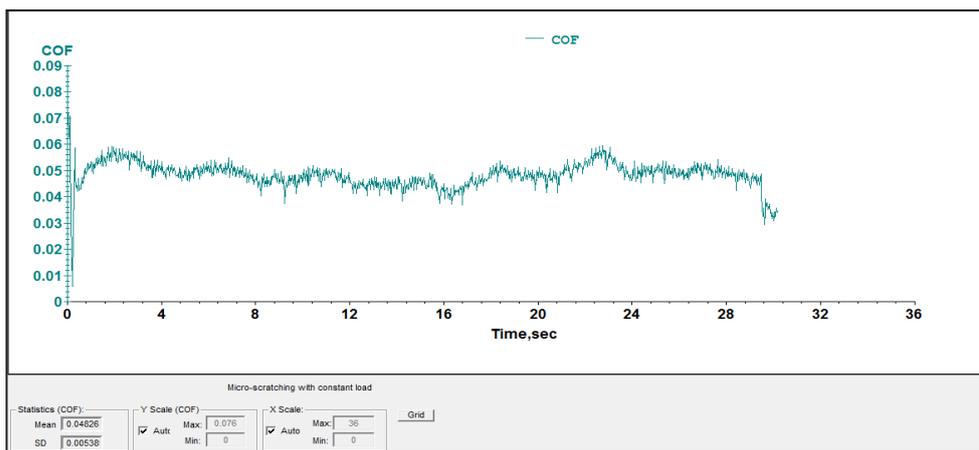
Risco nº3 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 30 N – D: 4mm



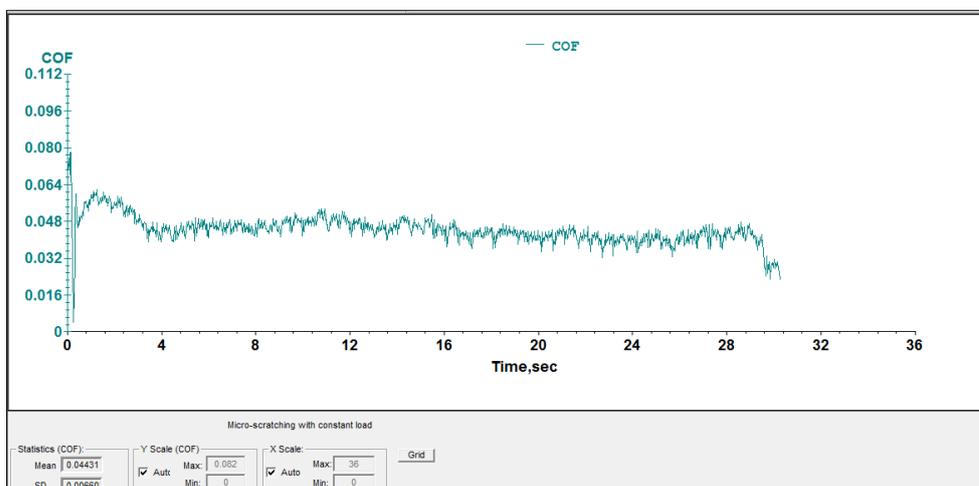
Risco nº1 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 35 N – D: 4mm



Risco nº2 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 35 N – D: 4mm

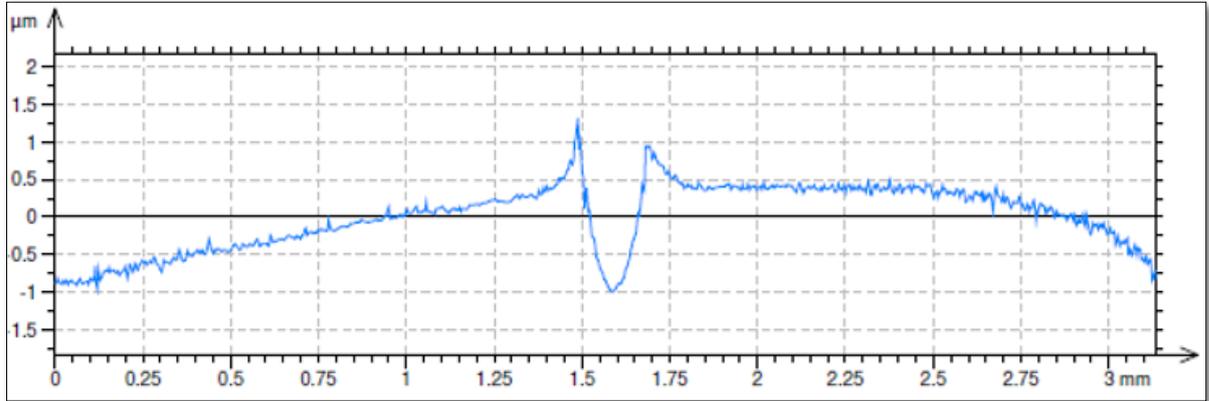


Risco nº3 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 35 N – D: 4mm

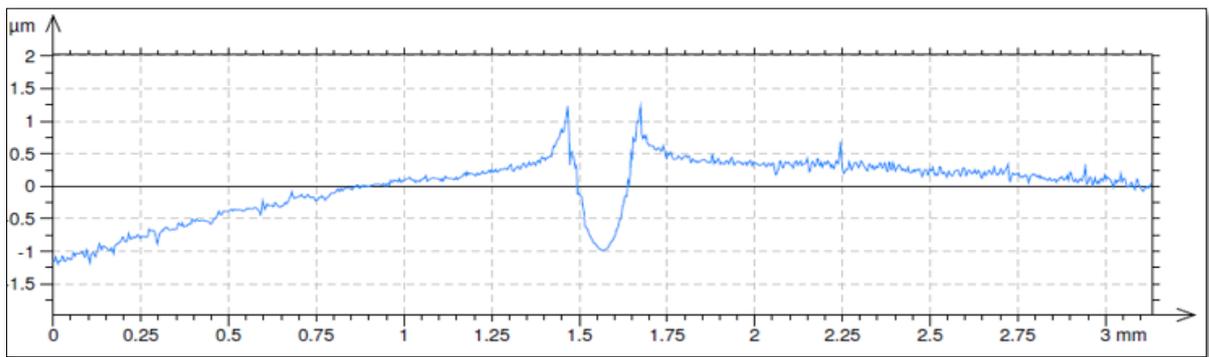


ANEXO B – PERFIL DE IMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO DE DESLIZAMENTO

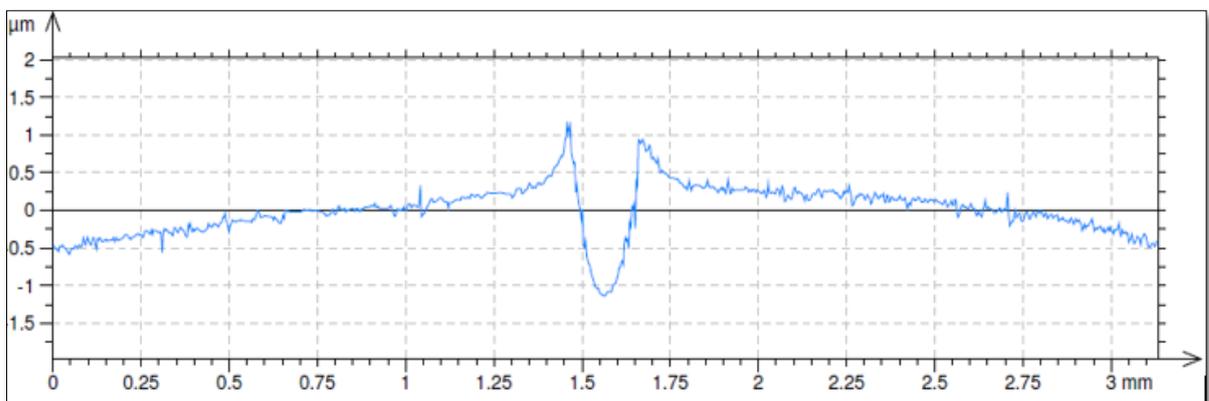
Risco nº1 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 32 N – D: 4mm



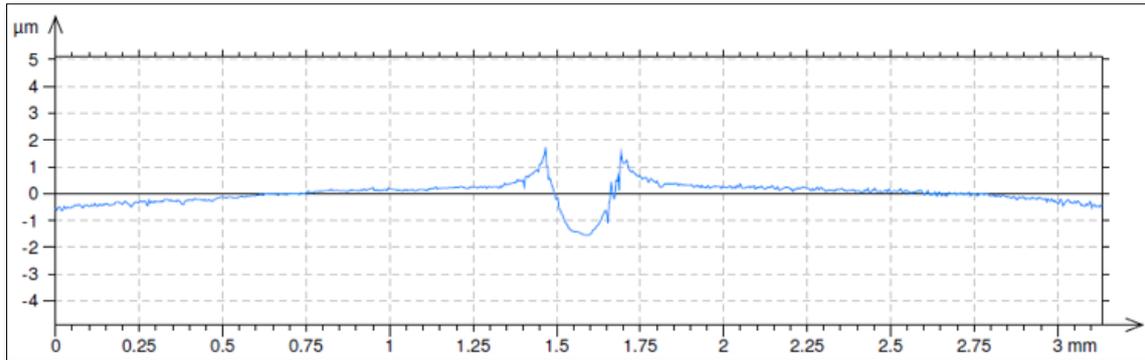
Risco nº2 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 32 N – D: 4mm



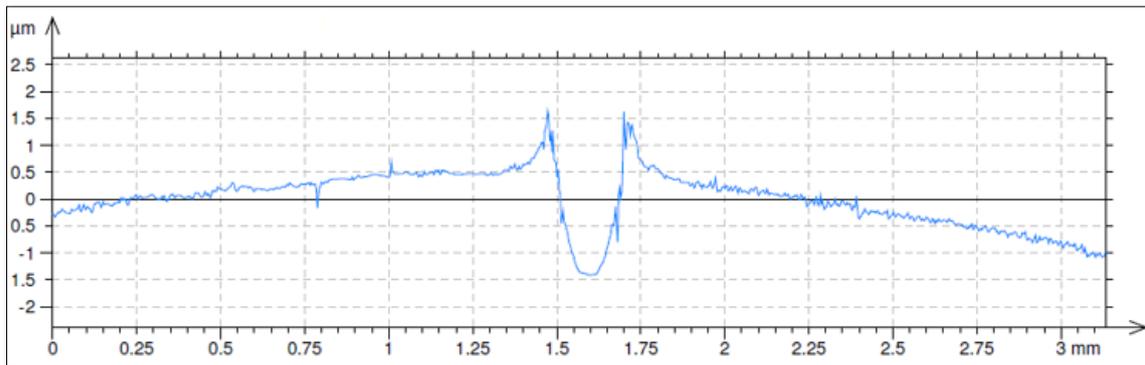
Risco nº3 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 32 N – D: 4mm



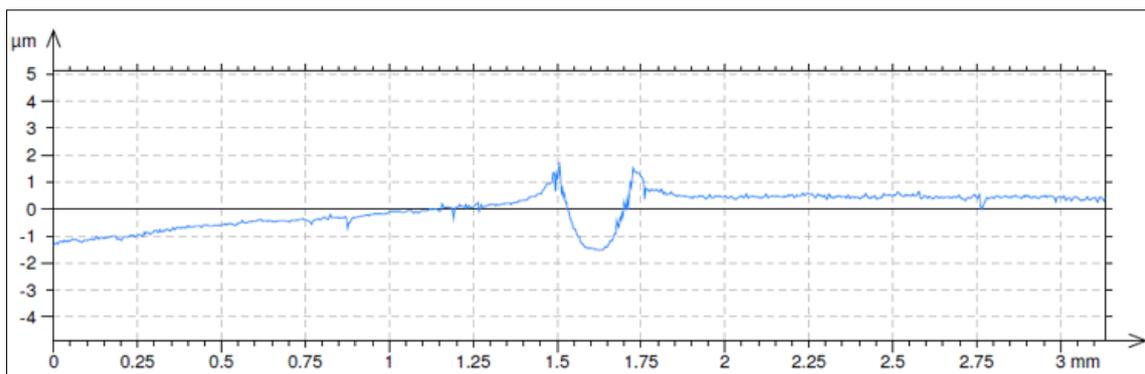
Risco nº1 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 44 N – D: 4mm



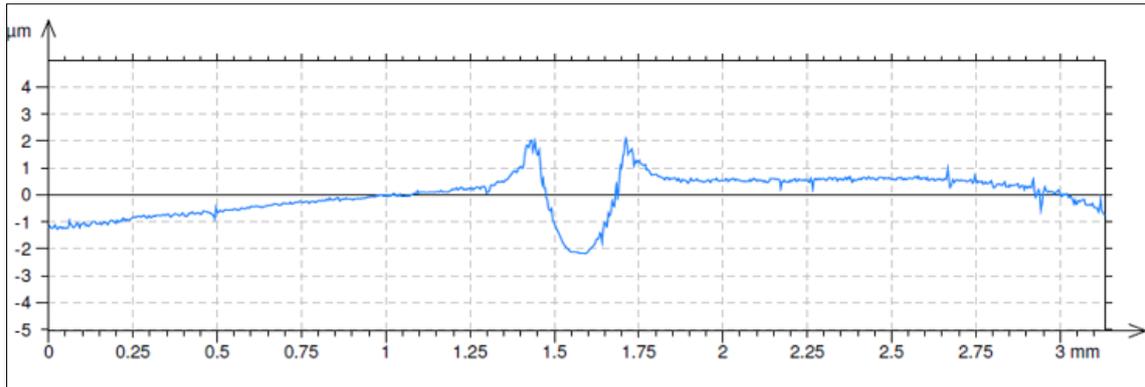
Risco nº2 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 44 N – D: 4mm



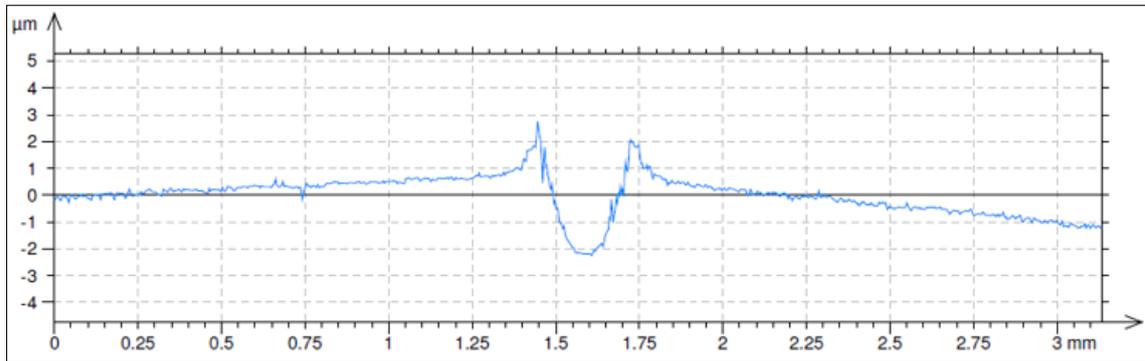
Risco nº3 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 44 N – D: 4mm



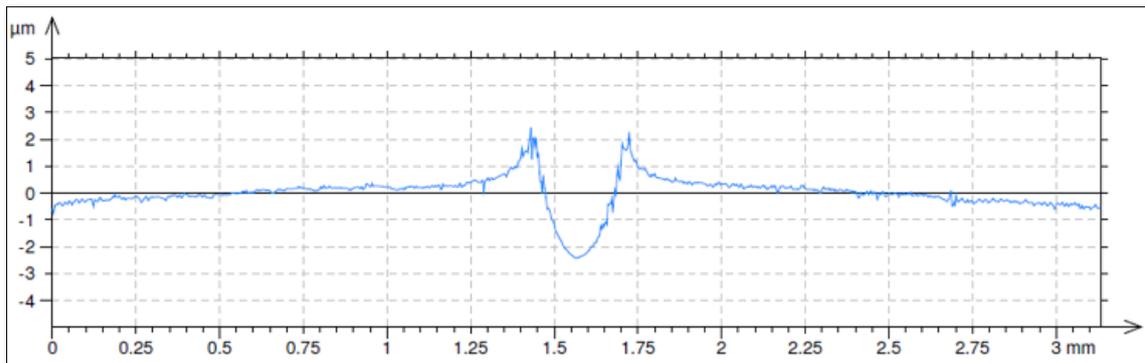
Risco nº1 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 62 N – D: 4mm



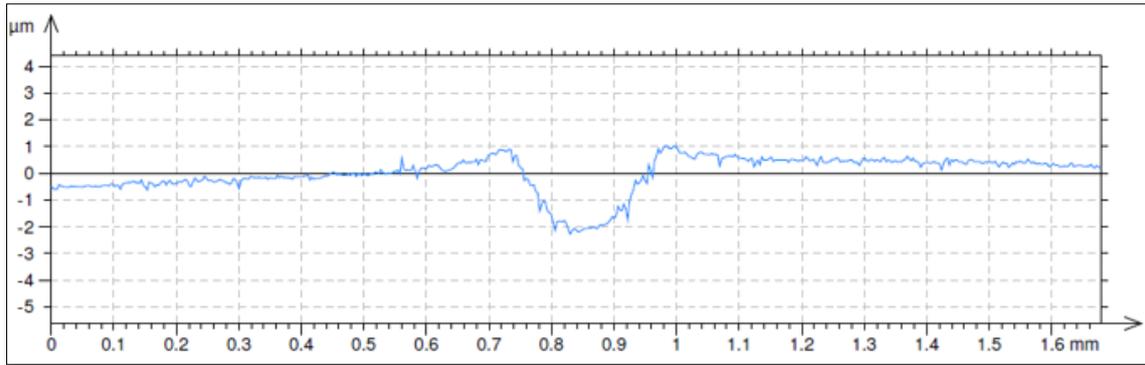
Risco nº2 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 62 N – D: 4mm



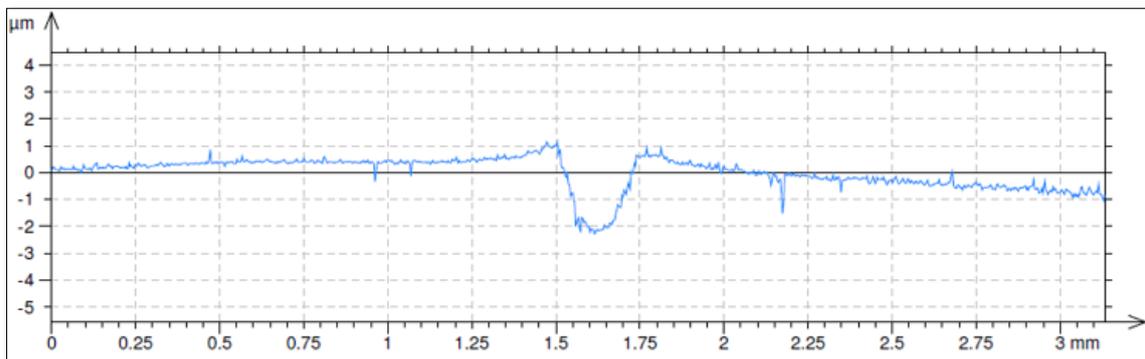
Risco nº3 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 62 N – D: 4mm



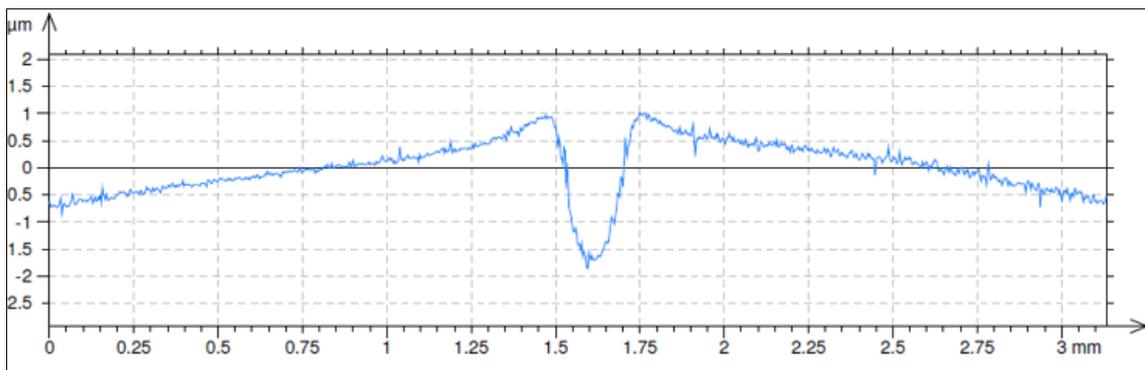
Risco nº1 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 52 N – D: 4mm



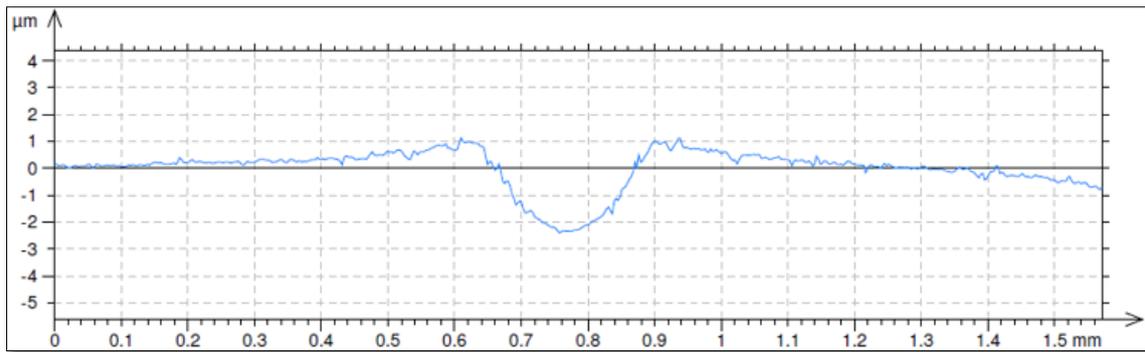
Risco nº2 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 52 N – D: 4mm



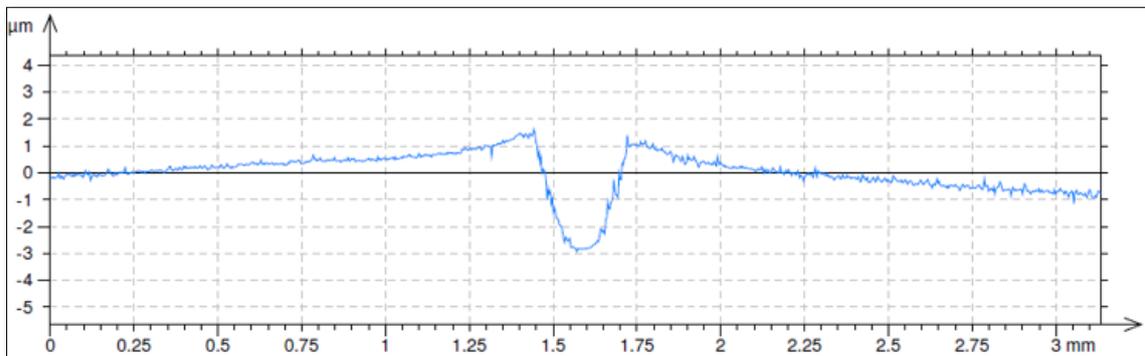
Risco nº3 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 52 N – D: 4mm



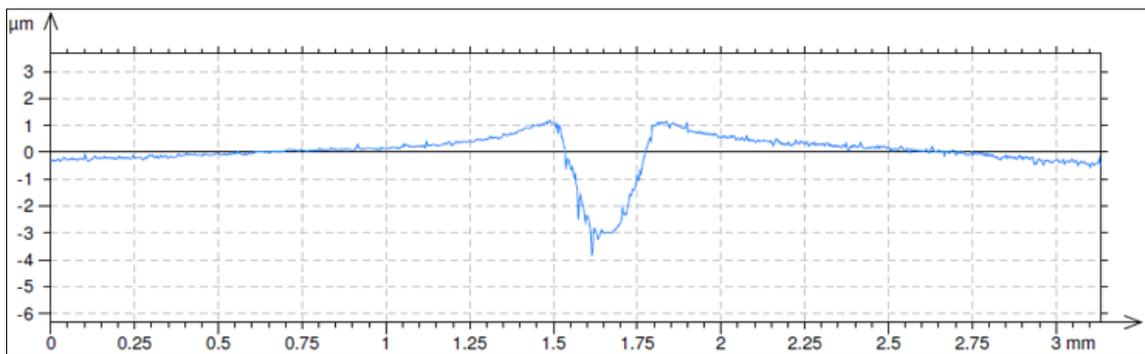
Risco nº1 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 72 N – D: 4mm



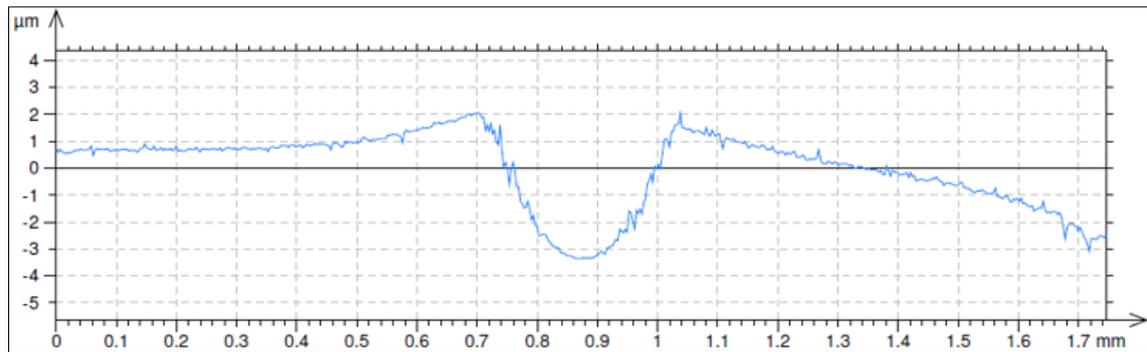
Risco nº2 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 72 N – D: 4mm



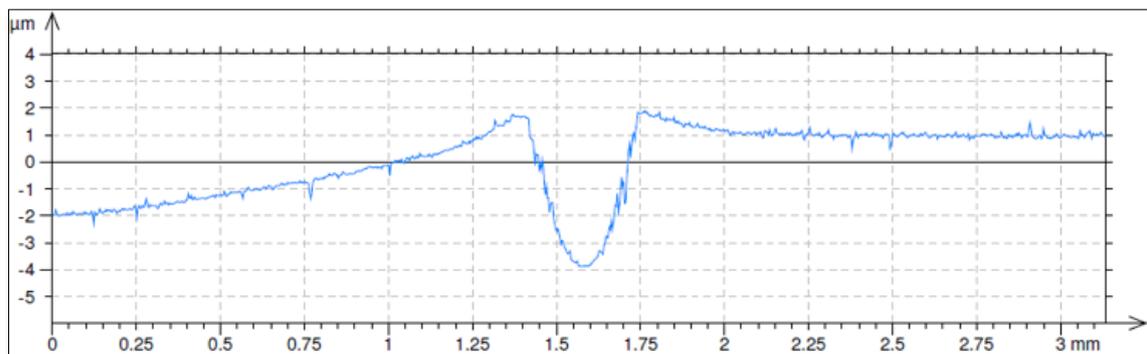
Risco nº3 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 72 N – D: 4mm



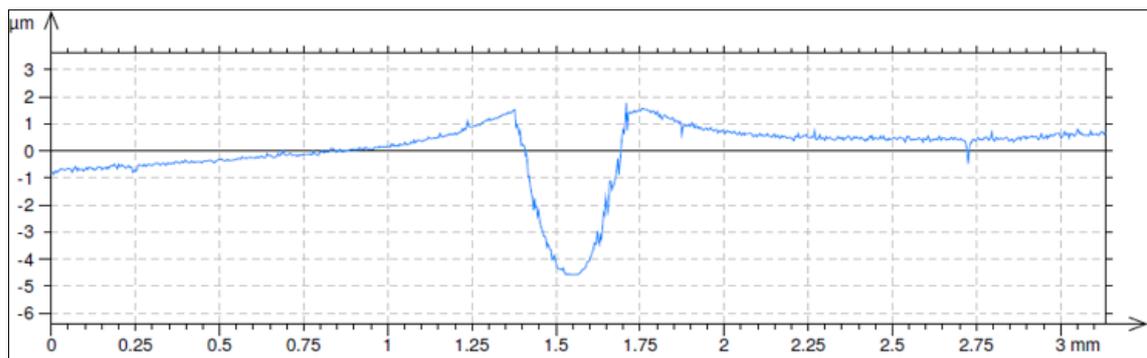
Risco nº1 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 100 N – D: 4mm



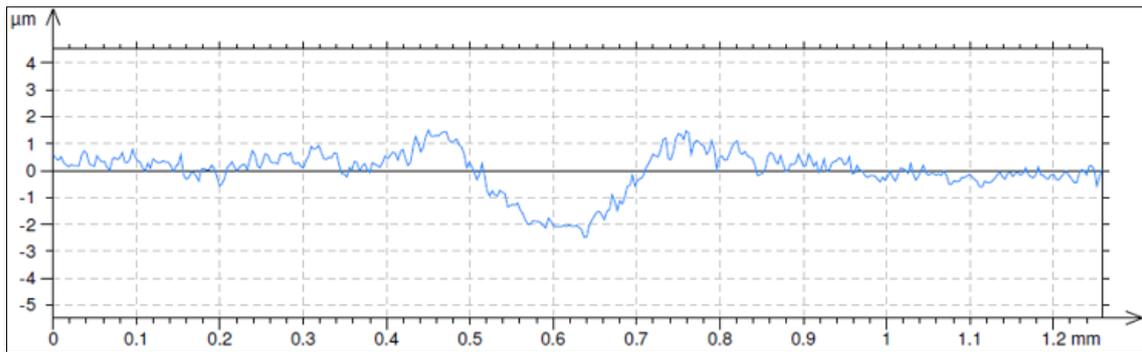
Risco nº2 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 100 N – D: 4mm



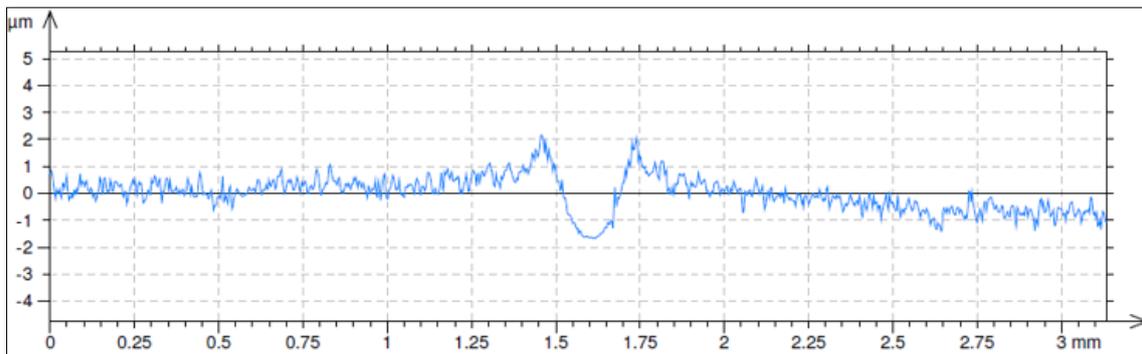
Risco nº3 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 100 N – D: 4mm



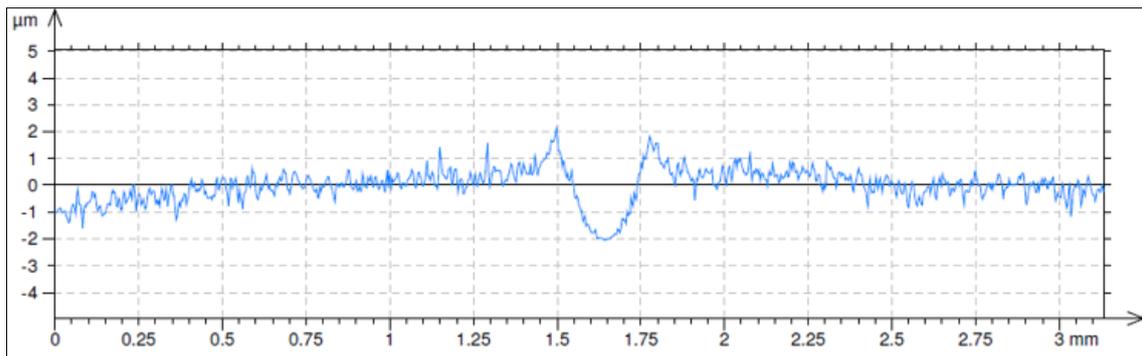
Risco nº1 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 25 N – D: 4mm



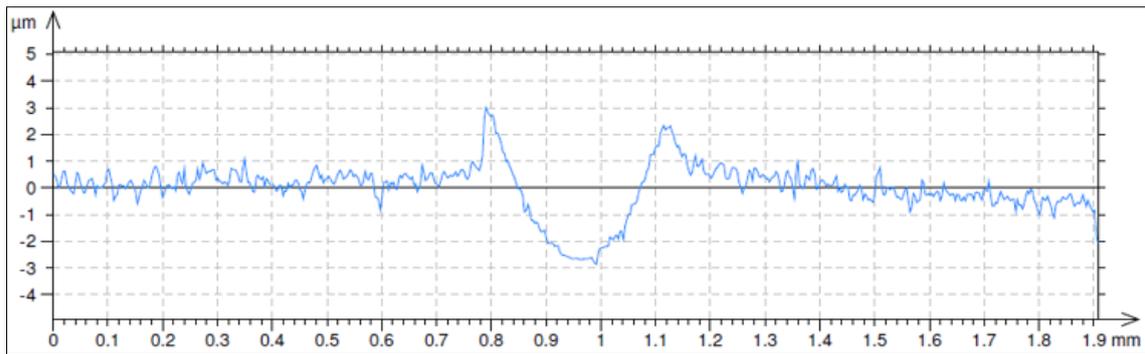
Risco nº2 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 25 N – D: 4mm



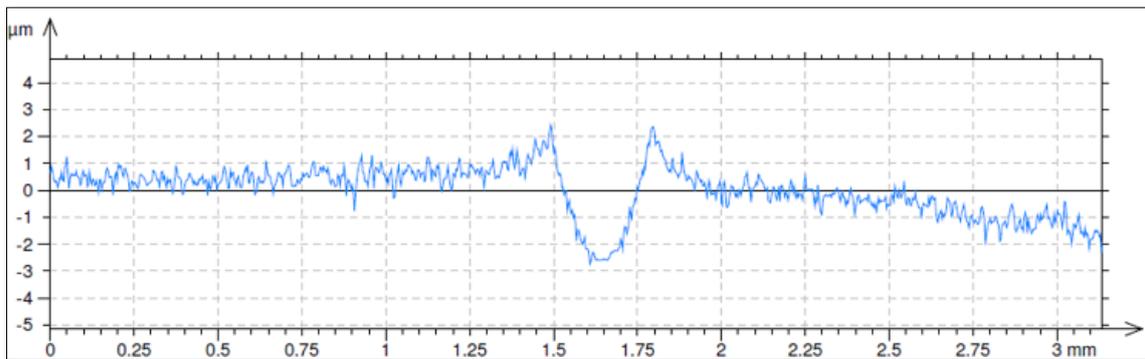
Risco nº3 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 25 N – D: 4mm



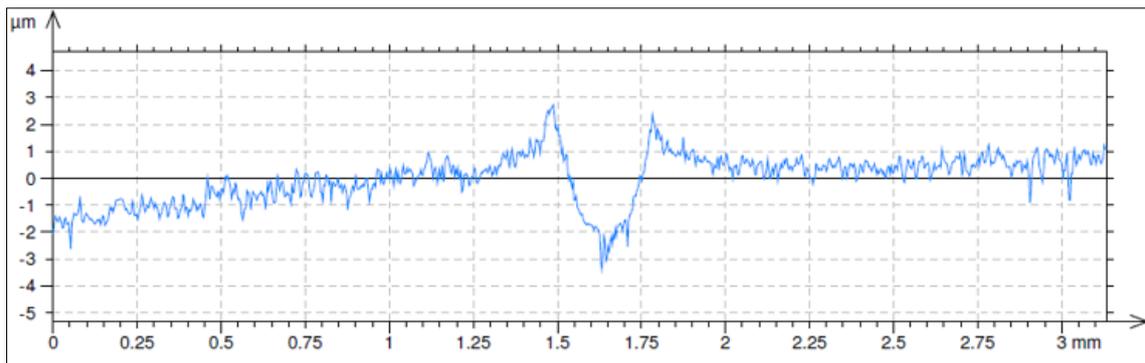
Risco nº1 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 30 N – D: 4mm



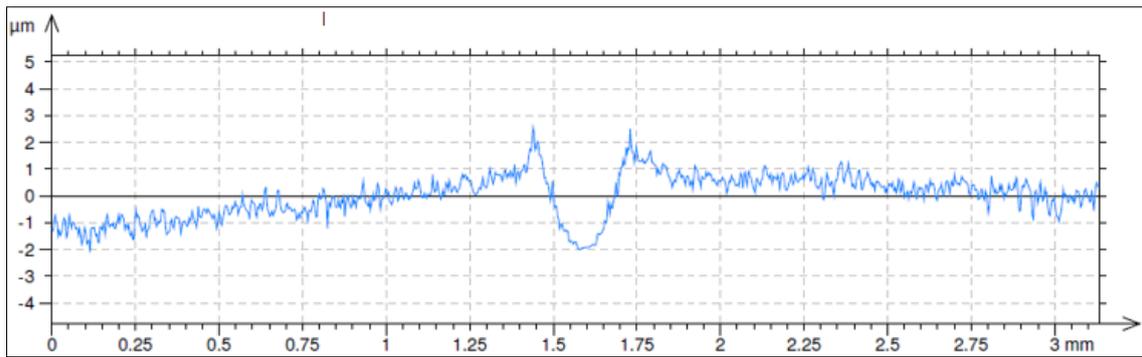
Risco nº2 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 30 N – D: 4mm



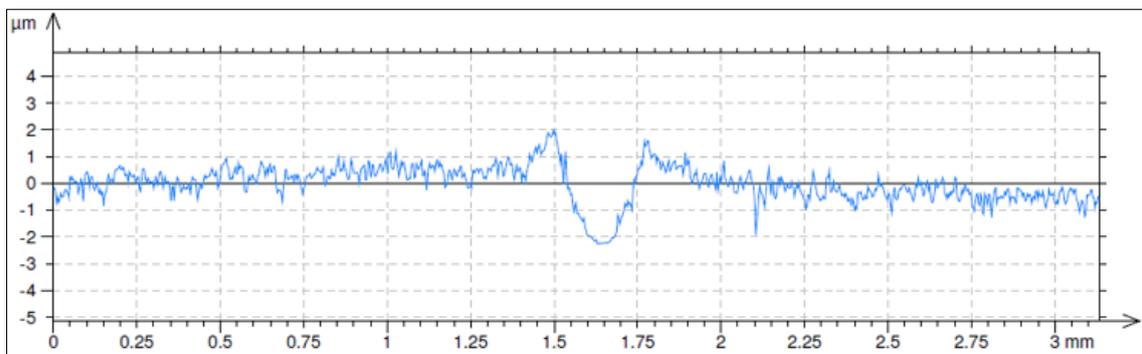
Risco nº3 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 30 N – D: 4mm



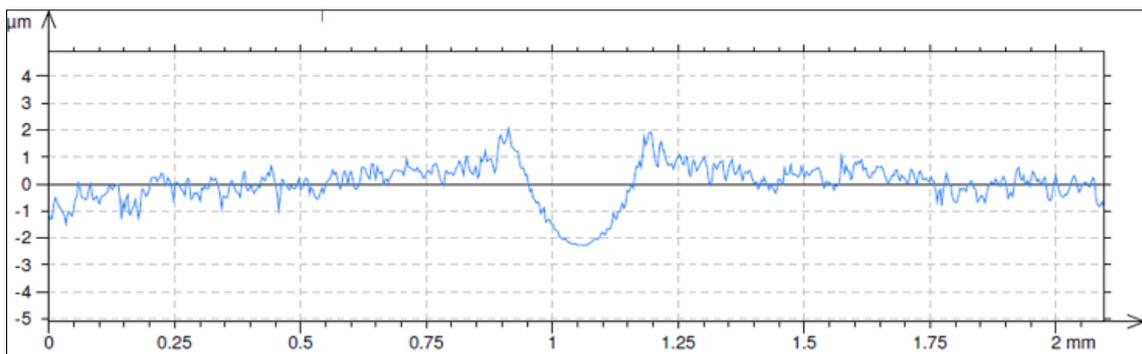
Risco nº1 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 35 N – D: 4mm



Risco nº2 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 35 N – D: 4mm

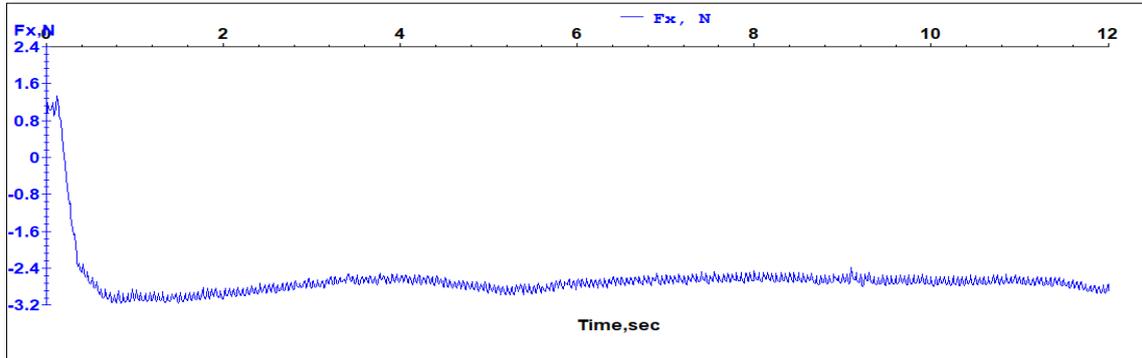


Risco nº3 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 35 N – D: 4mm

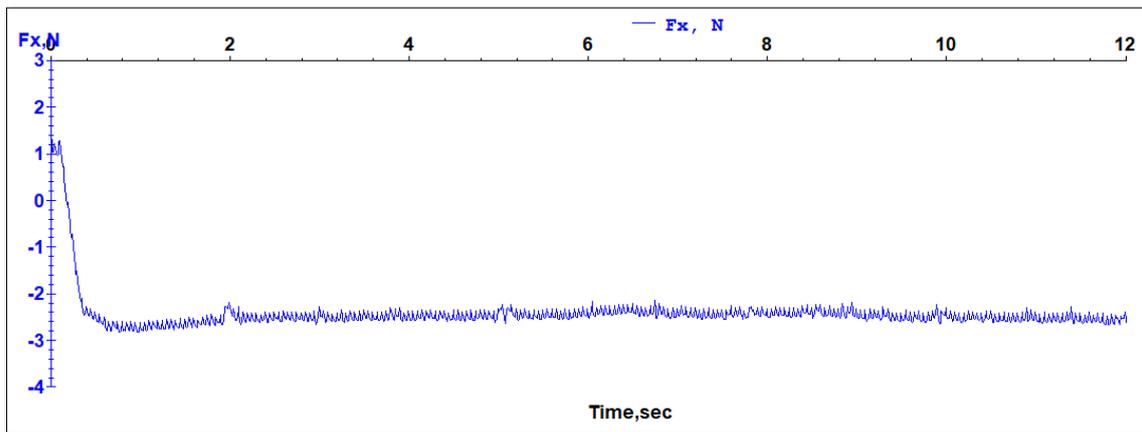


ANEXO C – GRÁFICO DO COEFICIENTE DE ATRITO VERSUS TEMPO

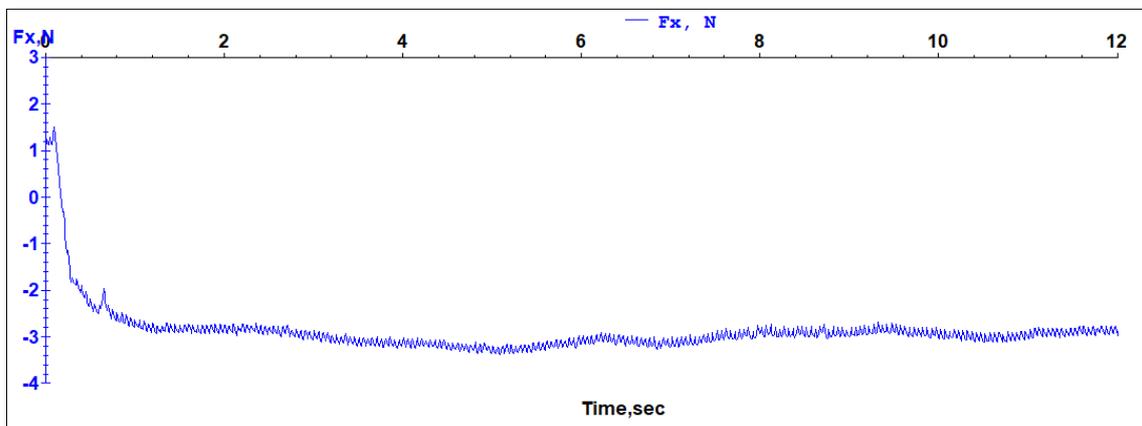
Risco nº1 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 32 N – D: 4mm



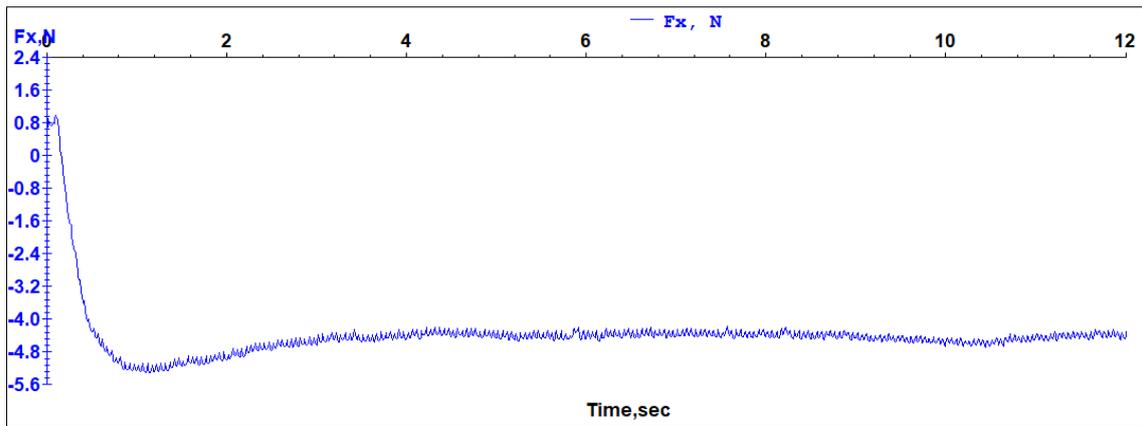
Risco nº2 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 32 N – D: 4mm



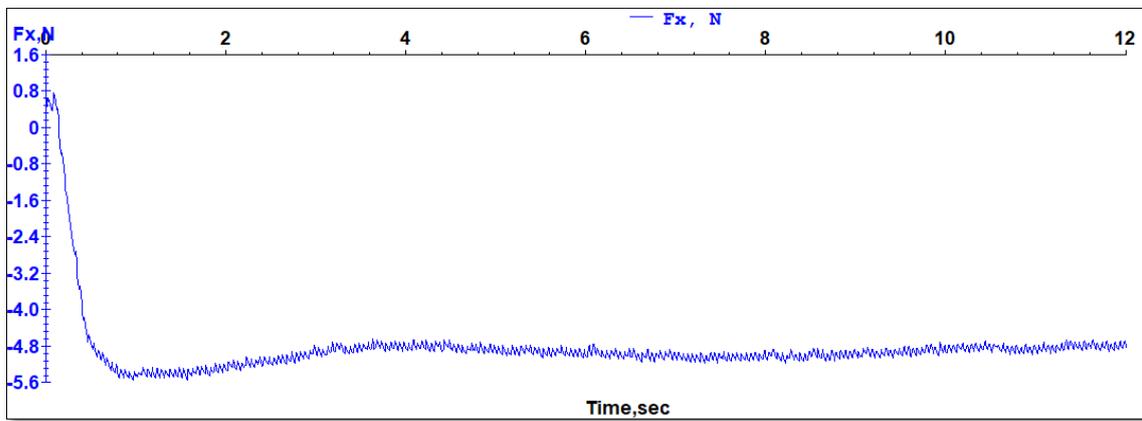
Risco nº3 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 32 N – D: 4mm



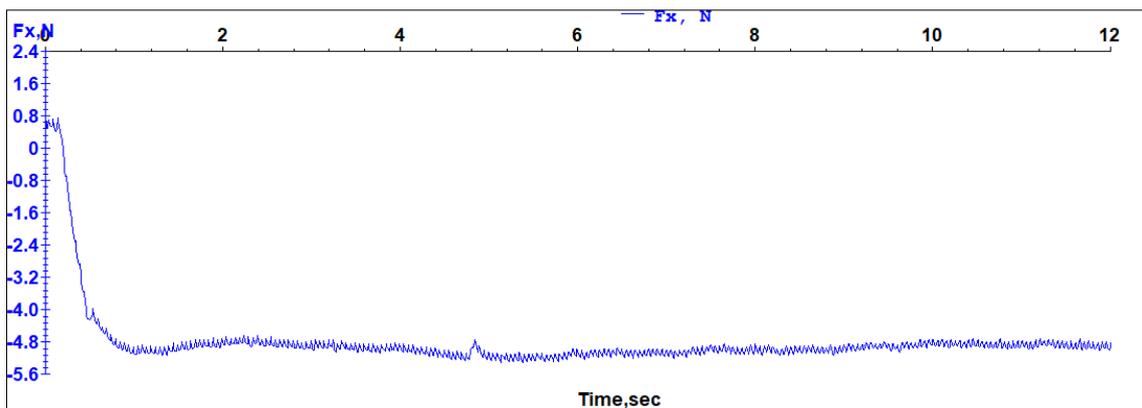
Risco nº1 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 44 N – D: 4mm



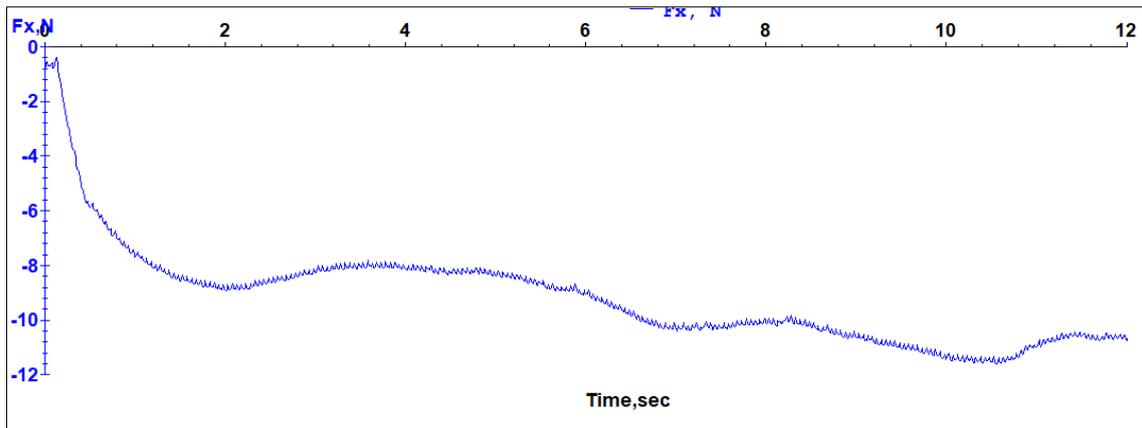
Risco nº2 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 44 N – D: 4mm



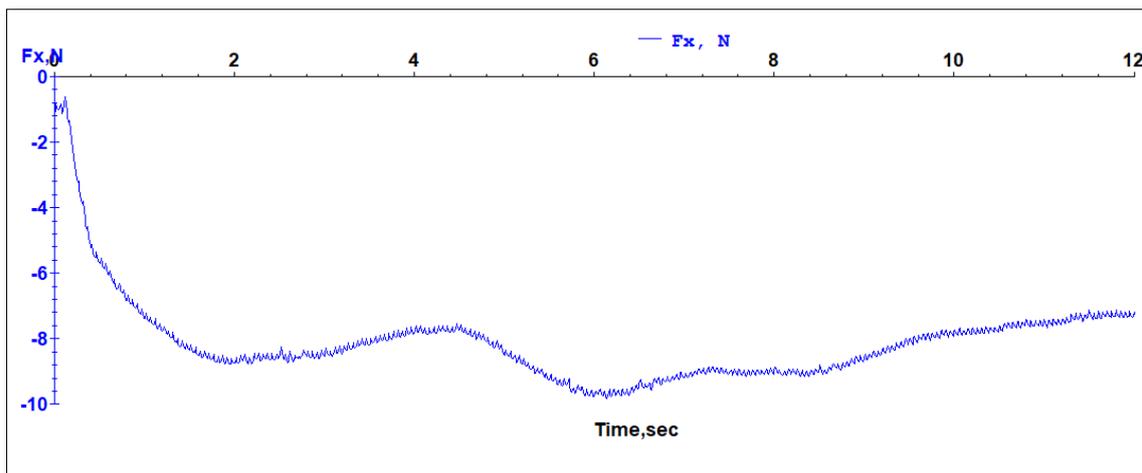
Risco nº3 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 44 N – D: 4mm



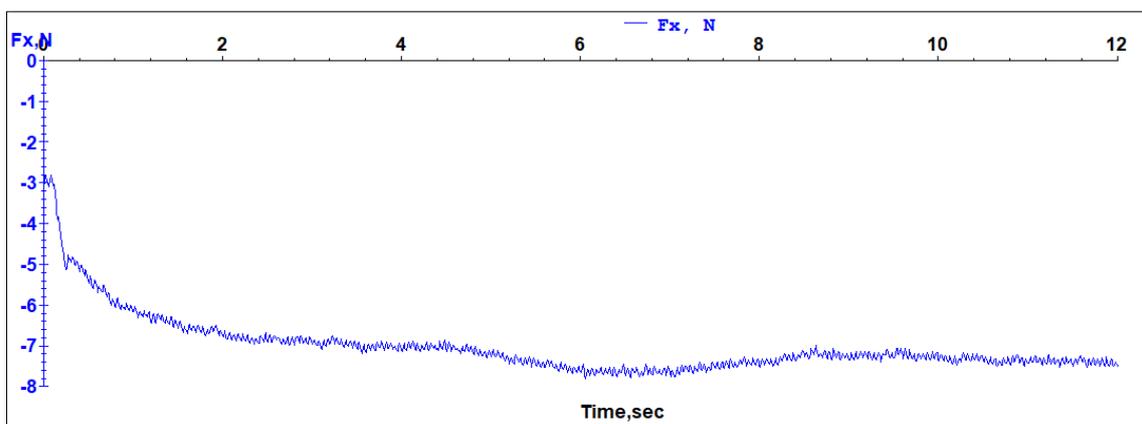
Risco nº1 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 62 N – D: 4mm



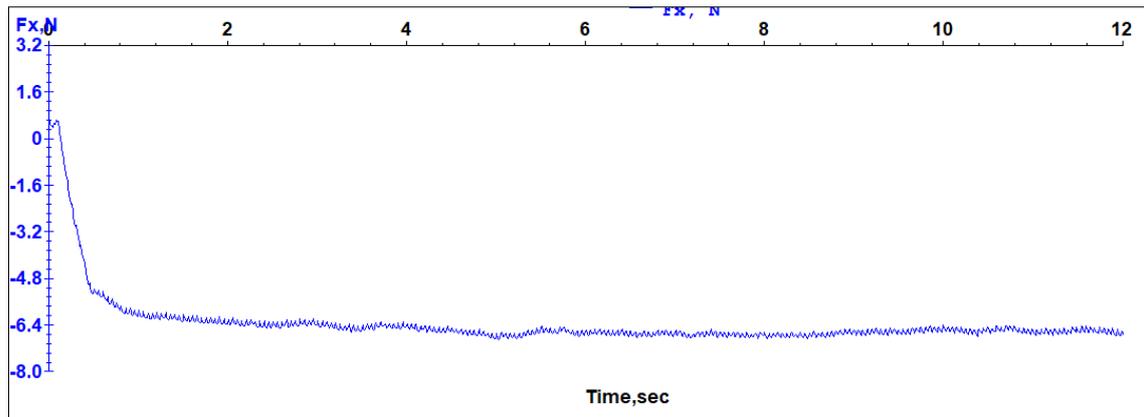
Risco nº2 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 62 N – D: 4mm



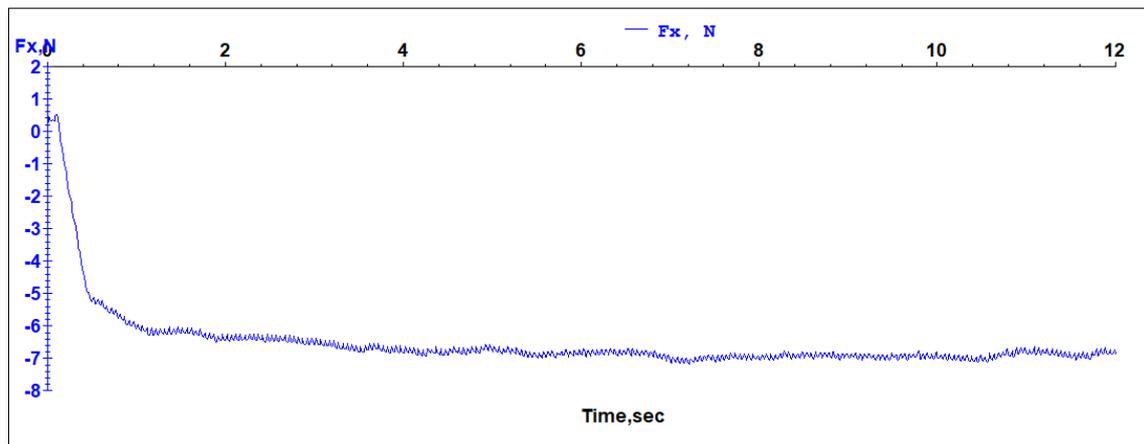
Risco nº3 - Aço Carbono AISI 1020 – Carga Aplicada: 62 N – D: 4mm



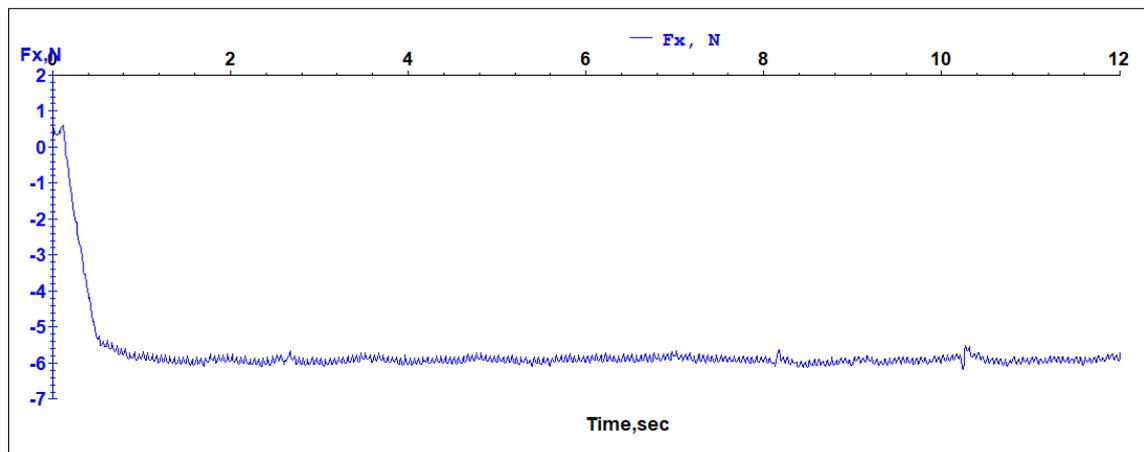
Risco nº1 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 52 N – D: 4mm



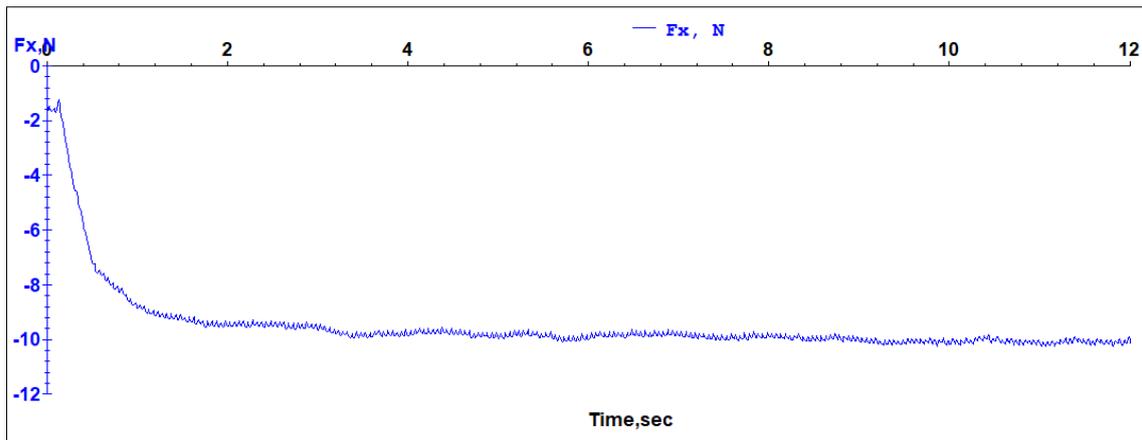
Risco nº2 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 52 N – D: 4mm



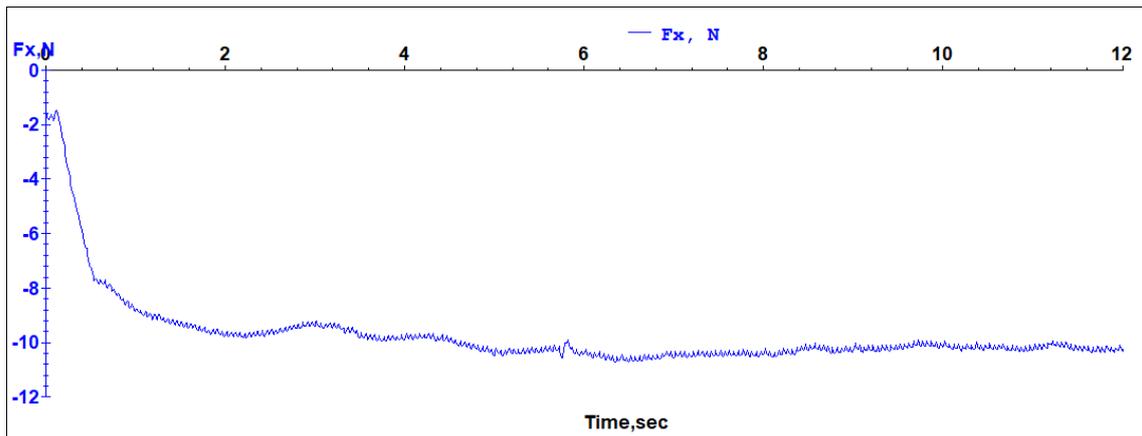
Risco nº3 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 52 N – D: 4mm



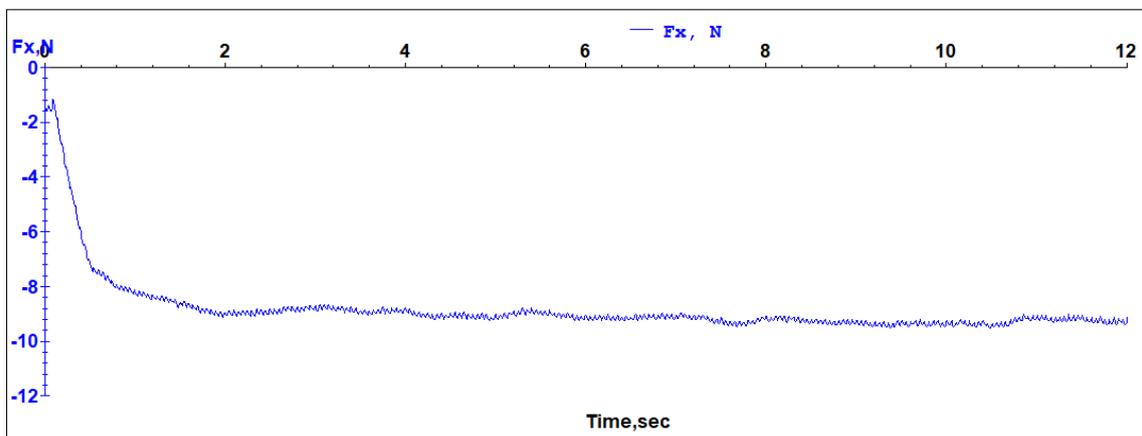
Risco nº1 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 72 N – D: 4mm



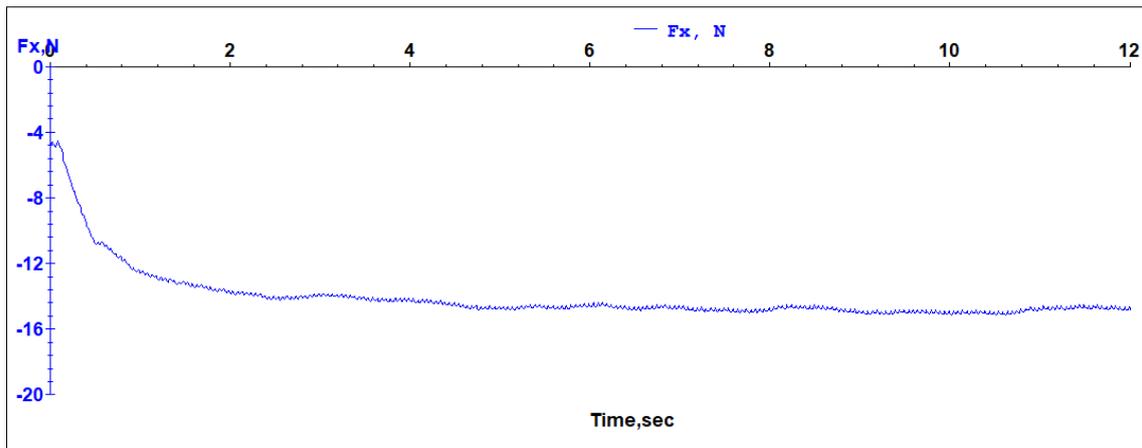
Risco nº2 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 72 N – D: 4mm



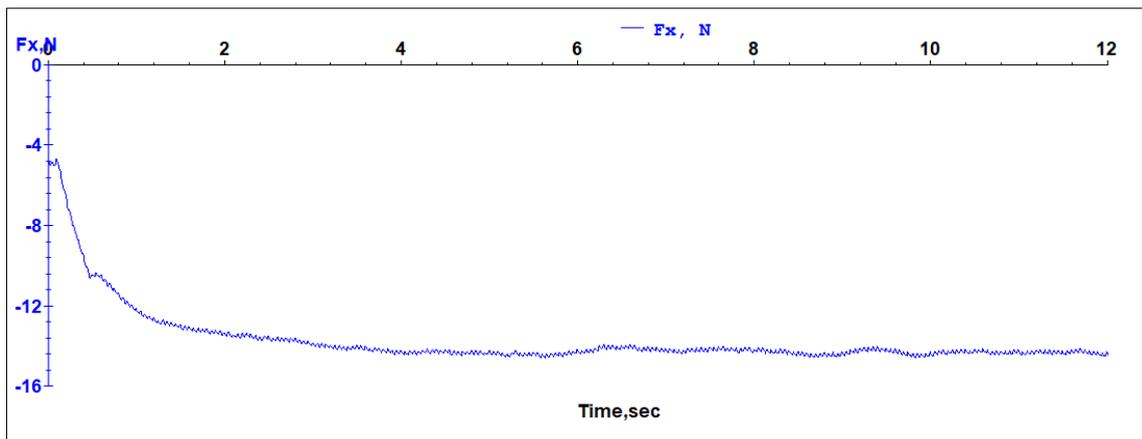
Risco nº3 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 72 N – D: 4mm



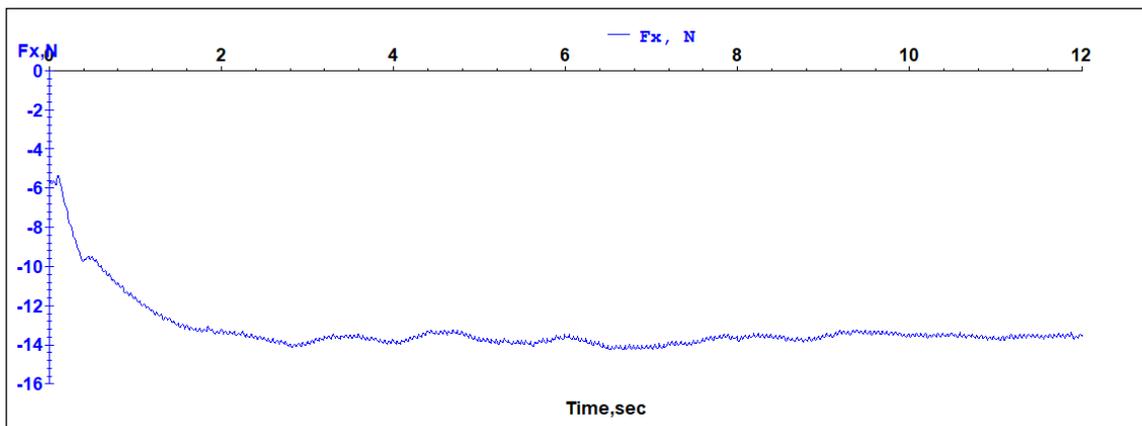
Risco nº1 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 100 N – D: 4mm



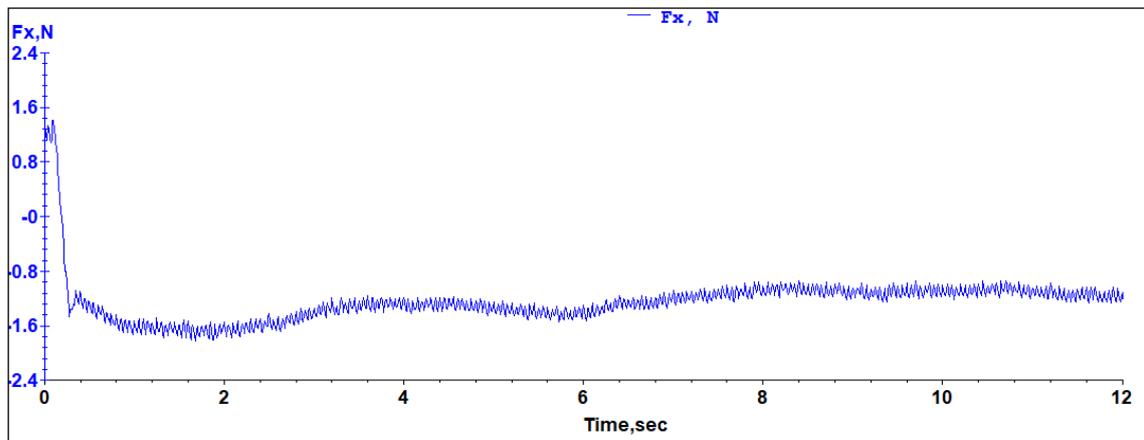
Risco nº2 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 100 N – D: 4mm



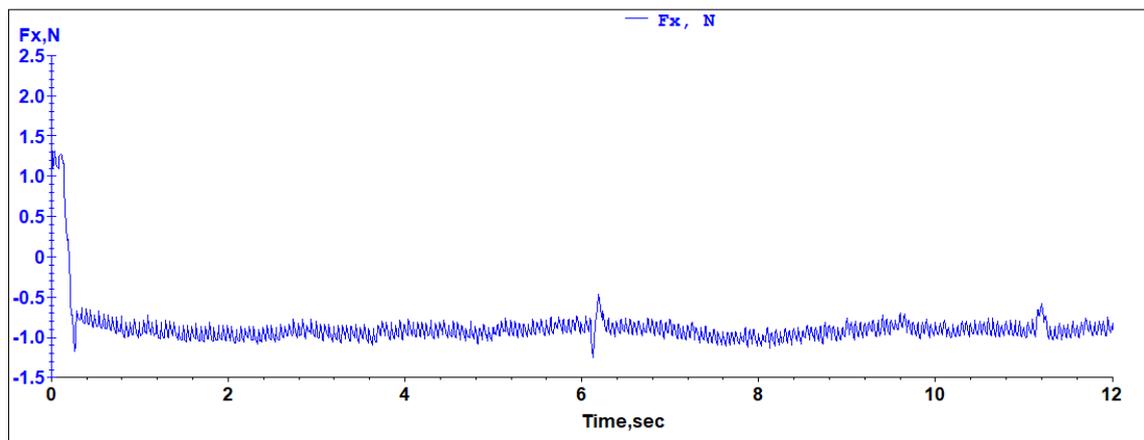
Risco nº3 - Aço Inoxidável AISI 316L – Carga Aplicada: 100 N – D: 4mm



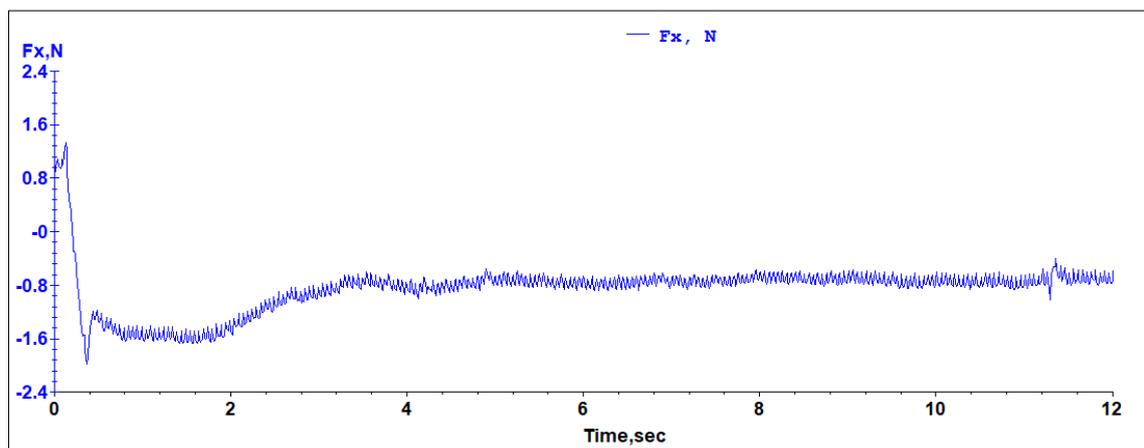
Risco nº1 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 25 N – D: 4mm



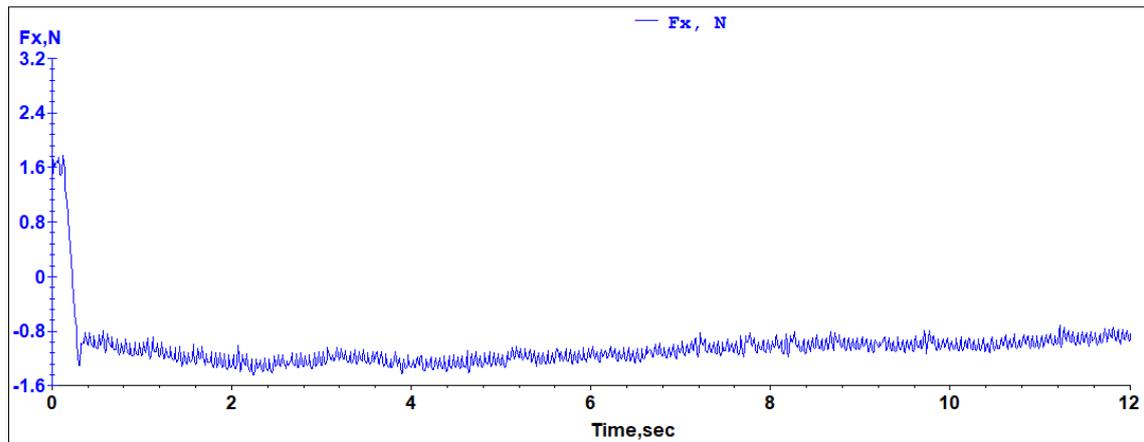
Risco nº2 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 25 N – D: 4mm



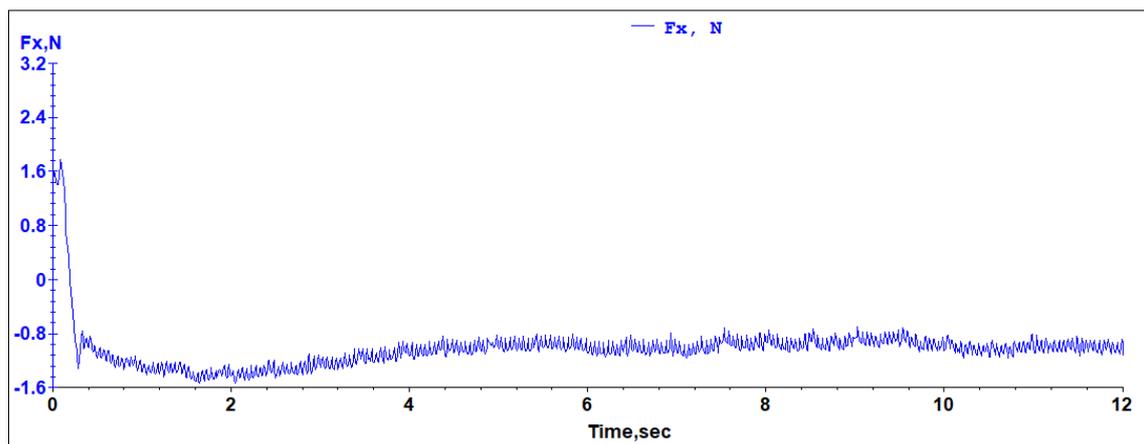
Risco nº1 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 25 N – D: 4mm



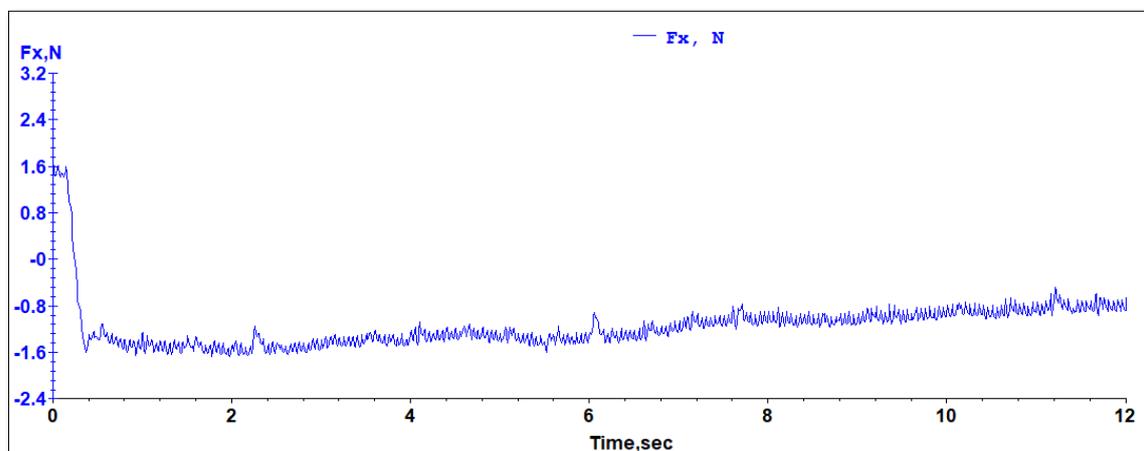
Risco nº1 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 30 N – D: 4mm



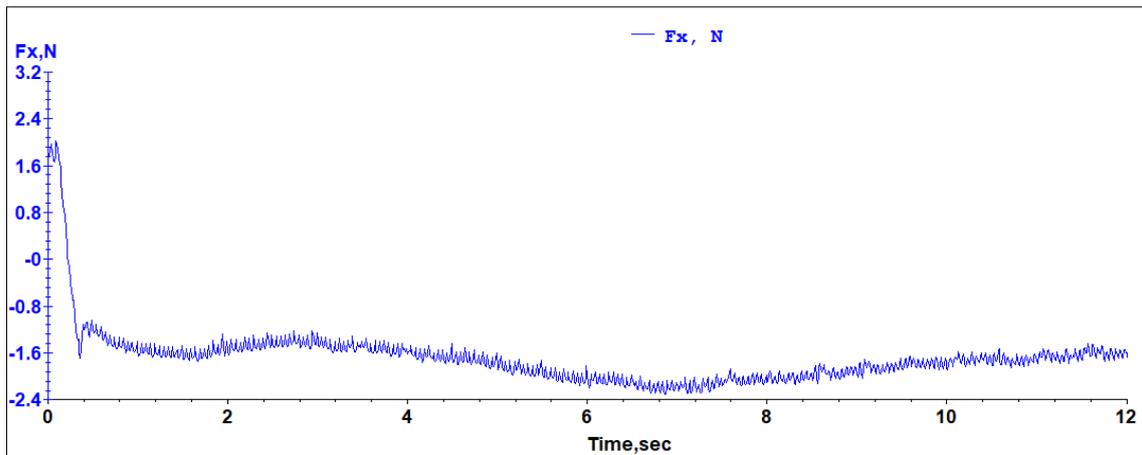
Risco nº2 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 30 N – D: 4mm



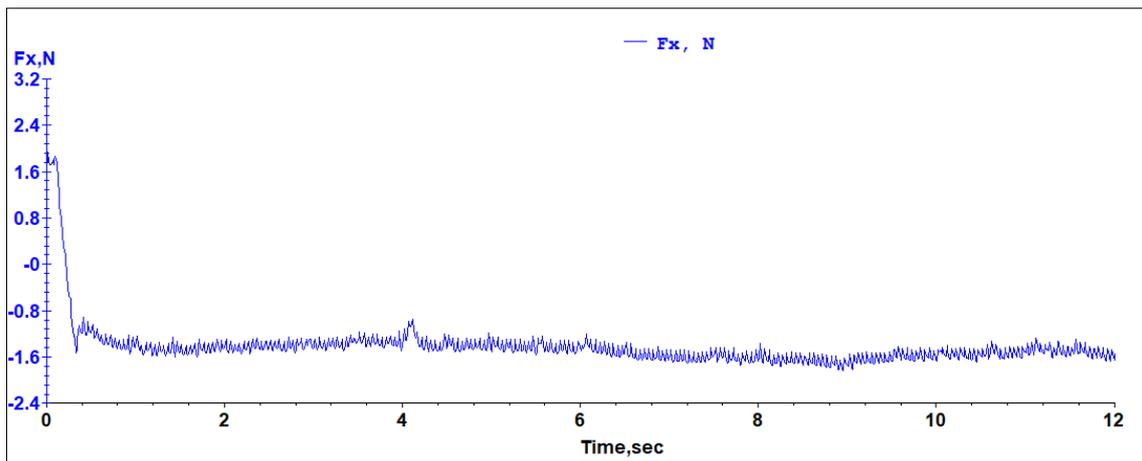
Risco nº3 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 30 N – D: 4mm



Risco nº1 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 35 N – D: 4mm



Risco nº2 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 35 N – D: 4mm



Risco nº3 – Alumínio 6063 T5 – Carga Aplicada: 35 N – D: 4mm

