

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

BRUNO PIANA
DANIEL GOZZO ANTONIETTO

EFEITO COMBINADO DE VARIÁVEIS OPERACIONAIS NO ENSAIO
DE RISCAMENTO NAS LIGAS DE AÇO INOXIDÁVEL 316L E
INCONEL 718

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(TCC 2)

CURITIBA
2019

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

BRUNO PIANA
DANIEL GOZZO ANTONIETTO

**EFEITO COMBINADO DE VARIÁVEIS OPERACIONAIS NO ENSAIO
DE RISCAMENTO NAS LIGAS DE AÇO INOXIDÁVEL 316L E
INCONEL 718**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr.

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Efeito Combinado de Variáveis Operacionais no Ensaio de Riscamento nas Ligas de Aço Inoxidável 316L e Inconel 718", realizado pelos alunos Bruno Piana e Daniel Gozzo Antonietto, 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 - UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

DAMEC - UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova

DAMEC-UTFPR

Avaliador

Curitiba, 26 de Junho de 2019

RESUMO

PIANA, Bruno & ANTONIETTO, Daniel G. **Efeito Combinado de Variáveis Operacionais no Ensaio de Riscamento nas Ligas de Aço Inoxidável 316L e Inconel 718**. 2019. 86 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento tribológico das ligas de aço 316L e INCONEL 718, sob efeito de variáveis, em um ensaio de riscamento linear. O material a ser ensaiado foi selecionado em razão de seu elevado coeficiente de encruamento, o que não favorece o aparecimento excessivo da morfologia de formação de bordas. Utilizando variadas combinações de parâmetros, tais como comprimento dos riscos variáveis e taxas de carregamento distintas, foram produzidos os riscos formados nas superfícies das amostras. Baseando-se na Norma ASTM G171 e operando o tribômetro disponível no LASC - UTFPR, foram realizados os ensaios de riscamento na superfície. Os resultados mostram que, ao seguir os scripts inseridos no software, o tribômetro não cumpre o passa-a-passo de maneira uniforme, expondo os resultados obtidos a diversas variações.

Palavras-chave: Aço Inoxidável 316L; INCONEL 718; Ensaio de Riscamento Linear; Ferramenta de Metal Duro Esférica;

ABSTRACT

PIANA, Bruno & ANTONIETTO, Daniel G. **Combined Effect of Operational Variables on Scratch Test on 316L Stainless Steel and Inconel 718**. 2019. 86 f. Work of Conclusion Course (Graduation in Mechanical Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2019.

This study aims to evaluate the tribological behavior of 316L stainless steel and INCONEL 718 under various effects in a linear scratch test. The material to be tested was selected due to its hardening coefficient, which does not benefit the appearance of the edge formation in its morphology. Using various combinations of parameters, such as lane sizes and loading rates, scratches on the samples surface were made. Based on ASTM G171 Standard and operating the tribometer available at LASC - UTFPR, the scratch test was performed. Subsequently, using an interferometer, the data were collected and analyzed. The results showed that, following the scripts uploaded in the software, the tribometer does not follow the step-by-step uniformly and the results of the component had several variations.

Keywords: 316L Stainless Steel; INCONEL 718; Linear Scratch Test; Spherical Carbide Tool;

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, namorada e família, que ao longo deste período no qual percorri na UTFPR, me prestaram suporte e me motivaram em seguir em frente.

Ao professor orientador que nos auxiliou de maneira nobre e paciente na realização deste projeto e aos demais professores por dividirem seu conhecimento.

Agradeço a Deus pela fé.

Primeiramente agradeço a Deus, pela sua graça e amor infinito.

Agradeço à minha mãe por toda torcida, suporte e ajuda em todos os dias em que estive na UTFPR. Sem você, isto não seria possível.

Ao meu pai e toda família, pela torcida e apoio durante os anos.

À Laísa, pelo seu carisma, apoio e contribuição em cada desafio encontrado durante o curso.

Aos amigos dentro e fora da Universidade, cuja apoio foi muito importante, agradeço ao Ewerson por nossa amizade de longuíssima data e seus ótimos conselhos. Ao Fernando, pelo seu humor diferenciado e amizade indiscutível. À Gisele, pelas infinitas horas-aula que enfrentamos juntos e suas histórias sem fim. Ao Isaac, pela pessoa única que é e por toda sua contribuição no nosso trabalho.

Ao Professor Giuseppe, por sua dedicação, conhecimento, orientação e paciência. Sem o senhor não realizaríamos este trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do ensaio de riscamento.....	16
Figura 2 - Esquema apresentando as variações possíveis nos ensaios de riscamento	17
Figura 3 – Esquema apresentando parâmetros que influenciam no ensaio de riscamento.....	17
Figura 4 - Esquema representando as deformações existentes no ensaio de riscamento.....	22
Figura 5 - Esquema apresentando diferentes extremos em um ensaio de riscamento.....	25
Figura 6 – Variação da curva tensão-deformação para o ferro puro em função da temperatura.....	25
Figura 7 – Exemplo de gráfico tensão versus deformação de um metal submetido ao Ensaio de Tração.....	26
Figura 8 – Comparação entre os comportamentos típicos de tensão-deformação da curva de engenharia e da curva verdadeira em um ensaio de tração.....	27
Figura 9 – Topografia de uma superfície exibindo (a) pile-up e (b) sink-in provocadas por penetrador esférico.....	28
Figura 10 – Perfil de indentador esquematizando o pile-up e sink-in.....	28
Figura 11 – Representação esquemática das bordas (a) e da retração (b) em uma indentação esférica.....	29
Figura 12 – Representação da área real de contato entre duas superfícies.....	31
Figura 13 – Exemplo de Tribômetro e representação esquemática de suas partes.....	33
Figura 14 – Tribômetro CETR da UTFPR – Ecoville.....	34
Figura 15 – Imagens do indentador esférico.....	35
Figura 16 – Célula de Carga do Tribômetro CETR da UTFPR – Ecoville com indentador esférico.....	35
Figura 17 – Exemplo de gráfico do coeficiente de atrito versus distância percorrida em carregamento linear em ensaio de riscamento.....	40
Figura 18 – Exemplo de gráfico do carregamento versus distância percorrida em ensaio de riscamento.....	40
Figura 19 – Determinação da Carga de Contato entre Indentador e Amostra.....	41
Figura 20 – Determinação da Carga durante carregamento constante.....	41
Figura 21 – Determinação da Distância e Velocidade do ensaio.....	42
Figura 22 – Determinação das Cargas Iniciais e Finais nos Carregamentos em Rampa.....	42
Figura 23 – Determinação da Distância do indentador na retirada.....	43

Figura 24 – Exemplo de Salto observado no Ensaio E.....	49
Figura 25 – Efeito da aceleração inicial no ensaio de riscamento.....	50
Figura 26 – Efeito da desaceleração inicial no ensaio de riscamento.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos Materiais Aço 316L e Inconel 718	32
Tabela 2 – Esquema de distribuição dos carregamentos nos ensaios.....	37
Tabela 3 – Comprimento das Pistas dos Ensaios de Riscamento.....	44
Tabela 4 – Comprimento de Pista, Carregamento, Forças Tangenciais e Coeficientes de Atrito dos Ensaios de Riscamento.....	45
Tabela 5 – Comparação dos dados obtidos das forças tangenciais considerando e não considerando o Efeito da Aceleração.....	51
Tabela 6 – Comparação dos dados obtidos do coeficiente de atrito considerando e não considerando o Efeito da Aceleração.....	52
Tabela 7 – Comparação dos dados obtidos das forças tangenciais considerando e não considerando o Efeito da Desaceleração.....	54
Tabela 8 – Comparação dos dados obtidos do coeficiente de atrito considerando e não considerando o Efeito da Desaceleração.....	55

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Área de seção transversal do risco;
a – Raio da Impressão Obtida;
A_i – Área da seção Transversal Instantânea;
A_v – Área Transversal do material deslocado;
C – Carregamento;
d – Distância deslizada no ensaio de riscamento;
E – Módulo de Elasticidade;
F_a – Força Aplicada;
fab – Fator de Abrasão;
F_N – Força Normal;
F_T – Força Tangencial;
H – Dureza do material;
h – Altura da Crista;
H_{dr} - Dureza ao risco com indentador piramidal ou esférico;
K₁ – Fator de forma 1 do grão;
K₂ – Fator de forma 2 do grão;
K₃ – Fator de forma 3 do grão;
K_{dr} - Constante geométrica do indentador;
K_r – Coeficiente de Resistência;
n – Coeficiente de Encruamento;
p – Profundidade de penetração;
R - Raio da ferramenta esférica;
R_{des} – Resistência ao desgaste Abrasivo;
V_{des} – Volume Máximo de Desgaste;
U – Perda de Desgaste;
U_v – Perda de Desgaste Volumétrica;
w – largura do risco no ensaio de riscamento;
 σ – Tensão;
 σ_e – Tensão de Escoamento;
 σ_r – Tensão Limite de Resistência;
 σ_v - Tensão Verdadeira Aplicada ao Corpo de Prova;
 ϵ – Deformação;
 ϕ – Coeficiente de Encruamento;
 δ – Deformação Verdadeira sofrida pelo Corpo de Prova;
 Ψ – Grau de Formação de Bordas;
 μ – Coeficiente de Atrito;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTO DO TEMA	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 JUSTIFICATIVA	14
2 ENSAIO DE RISCAMENTO	15
2.1 SOBRE O ENSAIO DE RISCAMENTO	15
2.2 DUREZA.....	18
2.2.1 Definição	18
2.2.2 Dureza por Choque	19
2.2.3 Dureza por Penetração.....	19
2.2.4 Dureza por Riscamento.....	20
2.3 MECANISMOS DE DESGASTE	21
2.3.1 Desgaste Abrasivo.....	21
2.3.2 Fatores Influenciadores na Abrasão	23
2.4 ENCRUAMENTO	24
2.4.1 Introdução	24
2.4.2 Coeficiente de Encruamento	26
2.4.3 Morfologia de Impressão	27
2.5 ATRITO	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 MATERIAIS	33
3.1.1 Materiais das amostras e penetradores.....	33
3.1.2 Propriedades dos materiais.....	33
3.2 TRIBÔMETRO	33
3.3 COMPONENTES E VARIÁVEIS DO ENSAIO	35
3.4 ENSAIO DE RISCAMENTO	40
3.4.1 Ensaios.....	40
3.4.2 Scripts.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 RESULTADOS ENSAIO A	47
4.2 RESULTADOS ENSAIO B	47
4.3 RESULTADOS ENSAIO C	48
4.4 RESULTADOS ENSAIO D	49
4.5 RESULTADOS ENSAIO E	49
4.6 EFEITO DA ACELERAÇÃO	50
4.7 EFEITO DA DESACELERAÇÃO.....	53

4.8 CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS.....	59
ANEXO A – GRÁFICOS DO COEFICIENTE DE ATRITO VERSUS TEMPO	61
ANEXO B – GRÁFICOS DO CARREGAMENTO VERSUS DISTÂNCIA	71
ANEXO C – GRÁFICOS DA TAXA DE DO CARREGAMENTO.....	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DO TEMA

A seleção correta de materiais e aplicação de técnicas de análise de superfície podem favorecer o emprego das peças na atividade ideal, reduzindo significativamente os desperdícios na indústria.

O Laboratório de Superfícies e Contato – LASC, do Grupo de Pesquisa de Materiais, Tribologia e Superfícies – GrMaTS, vem desenvolvendo estudos sobre o desempenho tribológico de materiais e de tratamentos termoquímicos utilizando o ensaio de riscamento linear. Nos estudos, foi optado a utilização de tamanho da distância do risco de 10 mm de comprimento. Observou-se, entretanto, que variações desta pista levam a resultados diferentes quanto ao comportamento do material ensaiado em função do atrito gerado, o que pode ser investigado.

Diante dos aspectos apresentados acima, torna-se pertinente o estudo acerca das variáveis operacionais e seus resultados obtidos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Neste projeto, o principal objetivo foi determinar a influência de variáveis em um ensaio de riscamento nas ligas de aço inoxidável AISI 316L e INCONEL 718.

Tendo como único fator constante a geometria do penetrador, as variáveis aplicadas neste estudo são o comprimento da distância do risco e o carregamento.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são, através da análise da taxa de carregamento, dos comprimentos da distância do risco e do coeficiente de atrito:

- Avaliar das forças tangenciais correlacionadas às variáveis estipuladas;
- Comparar os diferentes resultados provindos das combinações;

1.3 JUSTIFICATIVA

O ensaio de riscamento linear permite a verificação do comportamento de materiais quanto ao atrito, sob diferentes geometrias de contato mecânico. Dentre as mesmas, pode-se variar entre extremos, de uma esfera rígida até uma ferramenta de corte. Isto produz diferentes condições de deformação durante o processo, os quais podem ser usados para identificar comportamentos dos materiais em condições de corte sob usinagem.

Entretanto, algumas variáveis de ensaio afetam sobremaneira estes comportamentos, em particular o tamanho da distância do risco. Acredita-se que tal efeito se deve à distribuição do carregamento durante o risco.

Neste contexto, o trabalho visa compreender melhor o efeito combinado de algumas variáveis em materiais importantes para a indústria de óleo e gás, notadamente um aço inoxidável e uma liga de Ni. Ambos possuem coeficiente de encruamento relativamente elevado, quando comparados com outros materiais utilizados na indústria como o alumínio e aço AISI 1020, o que está inerentemente associado a uma maior dificuldade durante a usinagem destes materiais.

2 ENSAIO DE RISCAMENTO

2.1 SOBRE O ENSAIO DE RISCAMENTO

O ensaio de riscamento é um método para testar mecanicamente a superfície de uma amostra. Neste método, um elemento é utilizado para gerar um risco na superfície da amostra. A ação do riscamento pode, ou não, ser acompanhada pela formação de entalhes ou sulcos (ASM METALS HANBOOK, 1992).

Segundo a norma ASTM G171 (2009), o método é utilizado e empregado para obter as resistências de superfícies sólidas à deformação permanente, sob a ação de um único ponto. A principal particularidade para a obtenção dos resultados desejados é a produção de um risco mensurável na superfície testada sem causar grave fratura ou fragmentação.

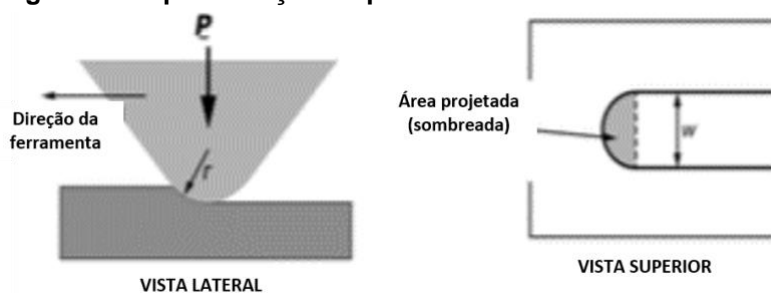
Segundo ASM Metals Handbook (1992), as principais abordagens deste ensaio são:

- Medir a dureza ao risco;
- Esclarecer os mecanismos de deformação e/ou remoção de material;
- Avaliar ou classificar materiais em relação à resistência à abrasão;
- Avaliar a aderência de um revestimento de superfície a um substrato.

Para o escopo deste trabalho, apenas os três primeiros tópicos serão descritos em detalhe.

Produzindo um risco em uma superfície sólida, o ensaio se baseia em movimentar uma ferramenta com geometria definida ao longo de uma amostra específica sob a ação de uma força normal e com uma velocidade constante. A representação deste ensaio, pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 - Representação esquemática do ensaio de riscamento



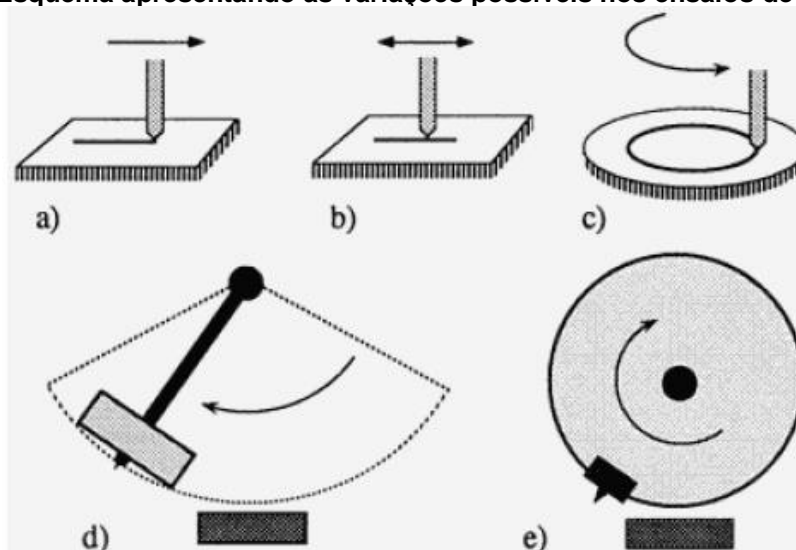
Fonte: ASTM, 2009.

De acordo com a norma ASTM G171 (2009), o aparelho deverá ser constituído de: montagem rígida da ferramenta e do suporte de amostra; meios para aplicação de força normal; e uma ferramenta para medir a largura do risco.

As fixações devem ser suficientemente rígidas para suportar as forças normais, laterais e tangenciais associadas ao processo de riscamento sem que ocorra deformação elástica ou plástica indevida.

Como representado na Figura 2, o caminho percorrido pela ferramenta pode ser em linha reta, circular, em uma direção e sentido específico ou ainda em ambos os sentidos. Descrevendo as possíveis variações nos ensaios de riscamento, a letra a) representa o ensaio o linear de passagem única, a letra b) mostra o ensaio linear recíproco e a letra c) o ensaio circular de passagens múltiplas. Por sua vez, a letra d) ilustra o pêndulo de Charpy e a letra e) apresenta a Máquina de Retificação Modificada.

Figura 2 - Esquema apresentando as variações possíveis nos ensaios de riscamento



Fonte: ASM Metals Handbook, 1992

No presente estudo somente o ensaio linear em única direção e sentido será realizado, exemplificado na Figura 2 pelo item a).

Representados na Figura 3 estão os fatores que influenciam o desgaste abrasivo em um ensaio de riscamento. É possível dividi-los em oito categorias: Movimento, Forças, Mecanismos de Deformação, Revestimento, Peça de Trabalho, Ambiente, Geometria do Sulco e Elemento Riscante. (ASM Metal Handbook, 1992).

Figura 3 - Esquema apresentando parâmetros que influenciam no ensaio de riscamento



Fonte: ASM Metals Handbook, 1992

De acordo com ASTM G171 (2009), os efeitos de umidade e outras condições atmosféricas ambientais podem afetar os resultados, dependendo da sensibilidade da amostra. Portanto, geralmente o ensaio é realizado sob temperatura ambiente e condições não lubrificadas.

A superfície em que o experimento será realizado deverá ser preparada adequadamente para o ensaio de riscamento, pois a sua rugosidade ou porosidade pode dificultar a obtenção de bons resultados de forma que as bordas do risco fiquem indistintas ou irregulares. Para garantir o ensaio sem defeitos ou desgastes, a ponta da ferramenta deve ser inspecionada com um microscópio e a superfície deve estar polida (ASTM G171, 2009).

O ensaio deve ser realizado sob baixas velocidades de deslocamento, minimizando possíveis efeitos de aquecimento por atrito, já que a taxa de deformação do material pode afetar a sua resistência à abrasão.

A força normal deve ser selecionada de modo a produzir um risco mensurável na superfície, mas não deve ser grande a ponto de causar fratura, fragmentação, ou outra forma de dano na superfície bruta. A força normal é variada para avaliar a resistência do material de teste ao aumento de tensões localizadas.

Para se obter os resultados, as medições são realizadas após a ferramenta ter sido removida. Desta maneira, é utilizada a deformação permanente resultante do riscamento, e não o estado instantâneo de deformação elástica e plástica combinada da superfície.

2.2 DUREZA

2.2.1 Definição

Pode-se definir dureza como a resistência do material à deformação plástica, geralmente por penetração (ASM METALS HANDBOOK, 1992). A dureza é expressa em termos da resistência à deformação local e é a propriedade do material que exprime a capacidade de resistir à ação de um penetrador duro (TABOR, 1956). Usualmente é expressa pela relação entre a força de penetração e a área de contato final entre o penetrador e o material ensaiado, o que resulta em unidades de pressão, tal como N/mm^2 (PINTAUDE, 2002).

Devido a ser mais simples e barato, o ensaio de dureza é mais frequente se comparado a qualquer outra verificação mecânica (CALLISTER, 2002).

Segundo Dieter (1961), existem diversos tipos de dureza por penetração em função da geometria do penetrador e das condições de aplicação de força. As durezas Brinell e Vickers destacam-se pela grande utilização.

A ideia de relação entre resistência ao desgaste abrasivo e dureza é intuitiva. Um conceito clássico muito difundido é a escala Mohs de dureza. Ela é mensurada com um número entre 1 a 10 dado a um material após ser submetido a riscamento de um grupo de materiais com valores definidos nesta escala, sendo o número 1 o talco

e 10 diamante (PINTAUDE, 2002). Para os metais, esta escala não é muito conveniente pois seus intervalos não são propriamente espaçados, principalmente nas regiões de alta dureza, não apurando precisamente as diferenças de dureza dos metais (SOUZA, 1982).

No que diz respeito aos tipos de dureza, podem ser classificados de três maneiras: Dureza por Choque; Dureza por Penetração e Dureza por Riscamento (SOUZA, 1982).

2.2.2 Dureza por Choque

A Dureza por Choque é um ensaio dinâmico, no qual se produz a impressão em um corpo de prova por meio de um penetrador que se choca a superfície plana. Este choque pode ser produzido por meio de um pêndulo ou por uma queda livre (SOUZA, 1982). Desenvolvido por Shore, é um dos métodos mais utilizados e mede a dureza através de um cálculo envolvendo a determinação da altura do ricochete do peso que cai livremente na superfície. Este cálculo determina a perda de energia do penetrador e absorvida pela superfície do metal. (SOUZA, 1982).

2.2.3 Dureza por Penetração

Tendo como principais métodos Vickers, Brinell e Rockwell, a dureza por penetração é composta pela compressão de um penetrador, geralmente esférico, sob uma superfície lisa e plana com um carregamento definido e por um período de tempo determinado. Esta compressão gera uma deformação plástica permanente na superfície e, através dos valores do diâmetro e profundidade medidos, é possível calcular o valor da dureza do material à penetração (SOUZA, 1982). Como ao retirar o carregamento sob a superfície há uma recuperação elástica, o diâmetro da impressão não é o mesmo quando a ferramenta está em contato com a superfície do metal, tornando a recuperação elástica do metal uma das limitações deste tipo de medição de dureza. Outra limitação observada na determinação da dureza por penetração é o valor do coeficiente de encruamento do metal a ser penetrado. Se for muito elevado, pode deformar o penetrador, alterando o valor da dureza medida (SOUZA, 1982).

2.2.4 Dureza por Riscamento

O ensaio de dureza por riscamento consiste em movimentar, com velocidade constante, a superfície a ser analisada sob um indentador, de geometria definida, gerando um risco cuja largura é mensurada através de observação em microscópio (LIRA; ALARCON, 2004).

Segundo Lira e Alarcon (2004), no processo de abrasão a superfície está sujeita ao contato com um conjunto de partículas abrasivas, podendo atuar diferentes mecanismos na deformação e remoção do material através de um fenômeno de riscamento múltiplo.

A técnica esclerométrica parte do princípio de isolar os efeitos de um contato elementar que risca a superfície, considerando que os efeitos atuantes em cada risco são independentes. Desta forma, permite avaliar quantitativamente a resistência à abrasão de determinado material, através da medida do efeito de uma partícula isolada, com geometria simples, que risca a superfície sob velocidade e carga controladas. O ensaio de dureza ao risco, através da técnica esclerométrica, consiste em movimentar, com velocidade constante, a superfície a ser analisada sob um indentador de geometria definida, gerando um risco cuja largura é mensurada. através de observação em microscópio (LIRA; ALARCON, 2004).

Segundo Mikowski (2008), a dureza ao risco é calculada através da equação (1):

$$H_{dr} = K_{dr} * \frac{N}{L^2} \quad (1)$$

Onde:

H_{dr} = Dureza ao risco com indentador piramidal ou esférico (Pa);

L = Largura do risco (m);

N = força normal aplicada (N);

K_{dr} = Constante geométrica do indentador ($K_{dr} = 4$ para indentador Vickers piramidal e $K_{dr} = 1$ para indentador esférico).

2.3 MECANISMOS DE DESGASTE

2.3.1 Desgaste Abrasivo

O desgaste é usualmente definido como o dano a uma superfície sólida envolvendo a perda de material. O desgaste abrasivo, por sua vez, é um processo tribológico que define o desgaste causado pelo movimento entre superfícies e/ou protuberâncias. A taxa em que as superfícies se desgastam depende de suas características, da presença de abrasivos, da velocidade de contato e de outras condições ambientais (ASM Metals Handbook, 1992).

Segundo ASM Metals Handbook (1992), quando um grão abrasivo desgasta uma superfície, o volume máximo de desgaste (V_{des}) é descrito pela equação (2).

$$V_{des} = A * d \quad (2)$$

Sendo A a área de seção transversal do risco (mm^2) e d a distância deslizada (mm). Para o cálculo de A, é necessário a utilização da equação (3).

$$A = K_1 * p \quad (3)$$

Correspondendo K_1 a um fator da forma do grão e p à profundidade de penetração (mm). Logo, para determinar a profundidade de penetração é utilizada a equação (4).

$$p = K_2 * \frac{C}{H} \quad (4)$$

K_2 refere-se a outro fator de forma do grão, C ao carregamento e H à dureza do material.

Associando as equações 3, 4 e 5 e utilizando o fator de forma K_3 , é obtida a equação de Archard, dada abaixo pela equação (5):

$$W = K_3 * \frac{C*d}{H} \quad (5)$$

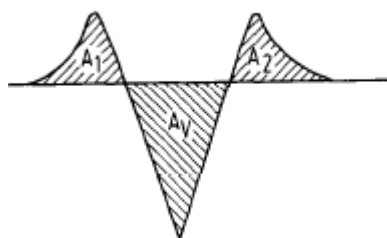
Para determinar a resistência ao desgaste abrasivo (R_{des}), utiliza-se a equação (6):

$$R_{des} = \frac{1}{W} \quad (6)$$

A Figura 4 apresenta a área de seção transversal perpendicular a uma ranhura de uma superfície inicialmente plana. Na qual A_V trata-se da área transversal do material deslocado e A_1 e A_2 as áreas transversais das cristas. Conhecendo estes parâmetros, é possível determinar o fator de abrasão, dado pela equação (7) (ZUM GAHR, 1987).

$$fab = \frac{AV - (A1 + A2)}{AV} \quad (7)$$

Figura 4 - Esquema representando as deformações existentes no ensaio de riscamento



Fonte: Zum Gahr, 1987

Em casos de microfissura ao invés de deformação, existe a formação de lascas, o que resulta em valores negativos para A_1 e A_2 . Neste caso, é considerado o fator de abrasão como zero (ZUM GAHR, 1987).

A perda de desgaste volumétrica, representada por W_v , é dada pela multiplicação da área A_v com o fator de abrasão fab e com a distância do risco d , como mostra a equação (8) (ZUM GAHR, 1987).

$$W_v = d * fab * A_v \quad (8)$$

Os valores de fab podem variar de zero até um. Para valores próximos ou igual a zero, os valores das áreas A_1 e A_2 são grandes, muito próximos ao valor de A_v . Ou seja, para casos em que o valor da altura h é elevado (Figura 5.a), o fator de abrasão é baixo. O outro caso extremo é no qual A_1 e A_2 possuem valores muito pequenos e, conseqüentemente, possuem h com valor baixo (Figura 5.b), tendo um fator de abrasão alto (GARRISON, 1986).

Figura 5 - Esquema apresentando diferentes extremos em um ensaio de riscamento



Fonte: Garrison, 1986

2.3.2 Fatores Influenciadores na Abrasão

Segundo ASM Metals Handbook (1992), as taxas de perdas por abrasão não são intrínsecas ao material. Fatores ambientais podem influenciar no processo abrasivo. Os principais aspectos que interferem o desgaste abrasivo são:

- Temperatura: Pode-se esperar que o desgaste abrasivo se intensifique à medida que a temperatura aumenta, uma vez que a dureza e a tensão de escoamento diminuem. Esta afirmação baseia-se no fato de que a tensão necessária para fazer o material fluir seja menor quando em temperaturas maiores. (ASM Metals Handbook, 1992).

- Velocidade de contato: Observou-se que a taxa de desgaste abrasivo aumenta ligeiramente com o incremento da velocidade no intervalo de 0 m/s a 2,5 m/s. Este aumento pode ser atribuído ao aquecimento por atrito. O efeito é pequeno pois toda a abrasão ocorre em um processo considerado adiabático, porém, em estudos aplicados seu valor é relevante (ASM Metals Handbook, 1992).

- Carregamento: O desgaste abrasivo foi mostrado como proporcional à carga seguindo a equação de Archard, mostrada na equação (5) (Buttery, Archard, 1969), a qual relaciona o volume máximo de desgaste com o carregamento, a área de seção transversal da pista e a distância deslizada. No entanto, este efeito proporcional não existe quando a carga é alta o suficiente para fraturar as partículas abrasivas. Caso as forças existentes fraturem as partículas abrasivas e criem novas pontas afiadas, o desgaste pode aumentar. Por outro lado, se as pontas das partículas abrasivas estiverem arredondadas o desgaste diminuirá (ASM Metals Handbook, 1992).

- Umidade: Apesar do efeito da umidade não ser claro e unânime, é conveniente considerar que o desgaste geralmente se agrave com o aumento da umidade. (ASM Metals Handbook, 1992).

2.4 ENCRUAMENTO

2.4.1 Introdução

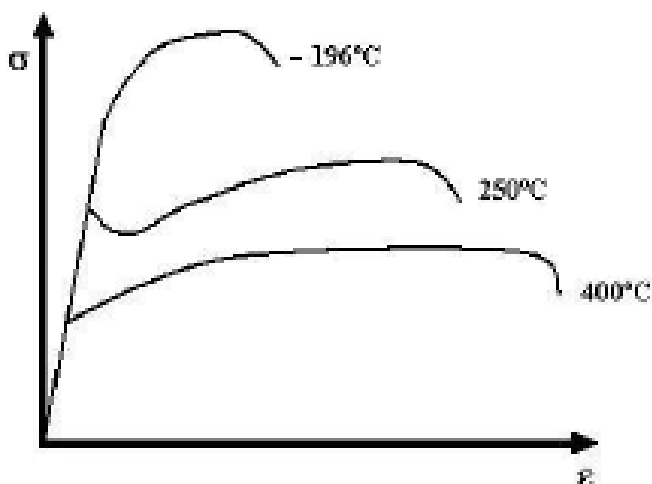
O encruamento é definido como o fenômeno pelo qual um material se torna mais duro e resistente quando submetido a uma deformação plástica. (CALLISTER, 2002). O encruamento consiste no aumento contínuo da tensão aplicada na superfície à medida que a deformação é conduzida. Além de ser uma característica típica do processamento a frio de metais, representa um dos mais importantes métodos ou operações industriais de endurecimento (CORREA, 2004).

O endurecimento é atribuído à redução da mobilidade média das discordâncias que, por sua vez, estão associadas ao principal mecanismo de deformação plástica do material, o deslizamento. Essa resistência à movimentação se dá pela formação de barreiras decorrentes da interação direta das discordâncias entre si e com outras imperfeições ou indireta, com campos de tensões também relativos a defeitos. Desta forma, diversos processos deverão contribuir para o encruamento do metal: multiplicação de discordâncias, interseção das mesmas resultando em discordâncias bloqueadas e degraus, falhas de empilhamento, refino de grão e transformação de fase (CORREA, 2004).

Devido à temperatura na qual a deformação é efetuada ser “fria” em relação à temperatura absoluta de fusão do metal, o encruamento também pode ser chamado de “trabalho a frio” (CALLISTER, 2008).

A Figura 6 mostra que existe um aumento da resistência mecânica e uma redução da ductilidade em temperaturas baixas, enquanto há um acréscimo da capacidade de deformação plástica em temperaturas maiores (DIETER, 1961).

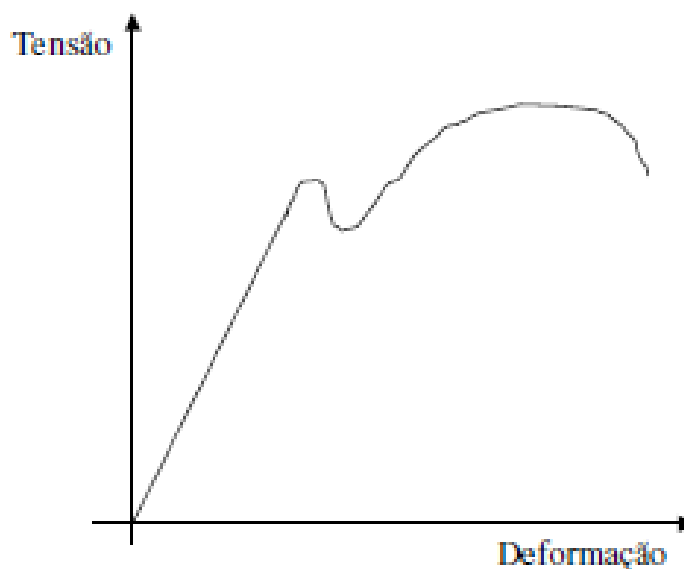
Figura 6 - Variação da curva tensão-deformação para o ferro puro em função da temperatura



Fonte: Dieter, 1961

Esta condição de endurecimento do material pode ser representada através do aumento do valor de tensão (σ) em função do aumento da quantidade de deformação (ϵ), aplicada ao mesmo mediante o traçado de uma curva tensão-deformação (Figura 7) (LOPES, 2009).

Figura 7 – Exemplo de gráfico tensão versus deformação de um metal submetido ao Ensaio de Tração



Fonte: Cipriano, 2008

2.4.2 Coeficiente de Encruamento

É possível mensurar a quantidade de trabalho a frio através do coeficiente de encruamento, representado por φ . O valor de φ é determinado pela equação (9) (CIPRIANO, 2008):

$$\sigma_v = Kr * \delta^\varphi \quad (9)$$

Sendo:

σ_v a tensão verdadeira aplicada ao corpo de prova;

Kr o coeficiente de resistência;

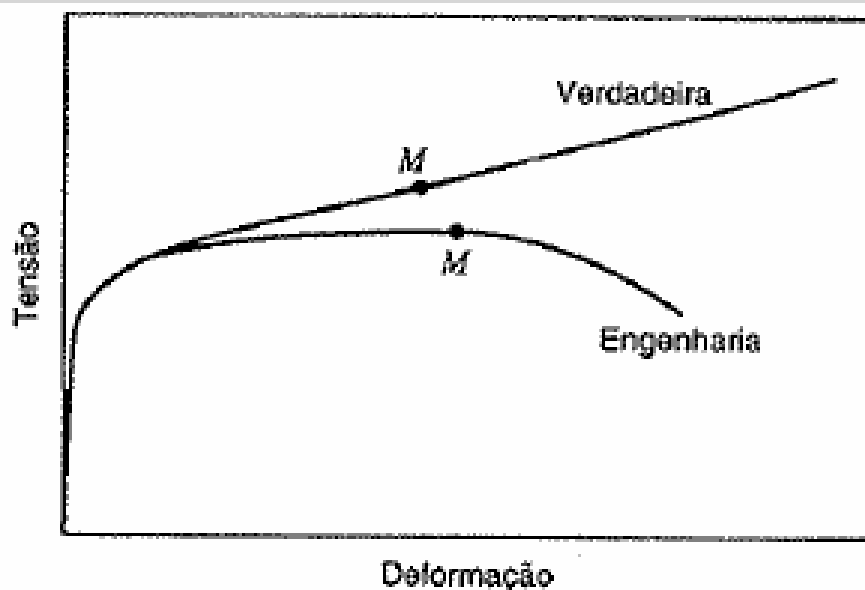
δ a deformação verdadeira sofrida pelo corpo de prova;

Os valores de Kr e φ são constantes do material, sendo que φ é adimensional e sempre menor que 1. Quanto maior o valor de φ , mais encruado encontra-se o material e maior é o aumento das tensões no início da região de encruamento (CIPRIANO, 2008).

Após atingir o ponto de máximo carregamento "M", observa-se pela Figura 8 que a tensão de escoamento diminui em função do aumento da deformação, o que caracteriza a estricção. Durante o encruamento ocorre um endurecimento do corpo de prova e continua até a ruptura do ensaio, porém a tensão diminui durante a estricção porque a área da seção transversal também diminui.

Aplicando-se o conceito de tensão na região da estricção, considerando a razão da força "Fa" pela área da seção transversal instantânea "Ai", obtém-se uma curva tensão-deformação diferente chamada de curva tensão-deformação verdadeira. Nesta curva, a tensão verdadeira aumenta com o início da estricção e permanece aumentando até a ruptura (CIPRIANO, 2008).

Figura 8 – Comparação entre os comportamentos típicos de tensão-deformação da curva de engenharia e da curva verdadeira em um ensaio de tração



Fonte: Cipriano, 2008

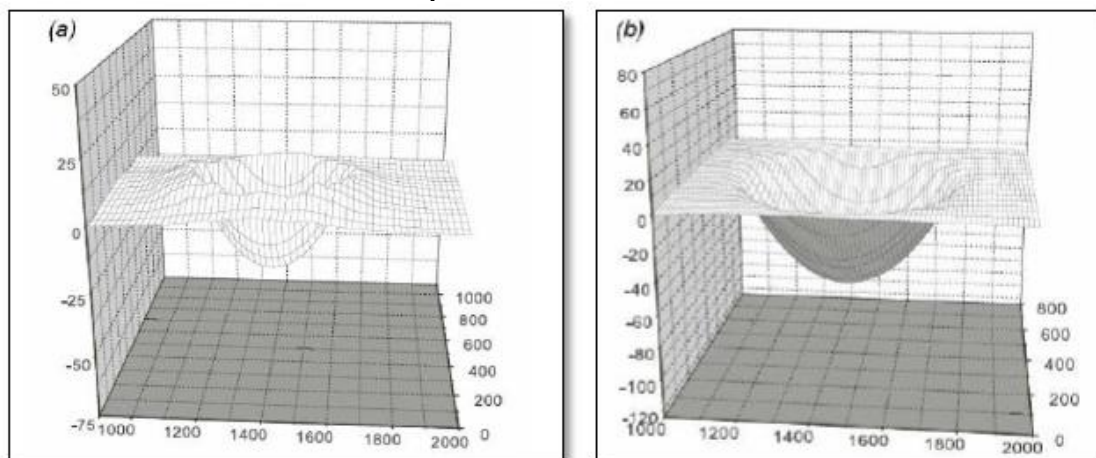
A tensão verdadeira “ σ_v ” também pode ser obtida pela razão entre a força aplicada “ F_a ” pela área da seção transversal instantânea “ A_i ” conforme equação (10) (CIPRIANO, 2008).

$$\sigma_v = \frac{F_a}{A_i} \quad (10)$$

2.4.3 Morfologia de Impressão

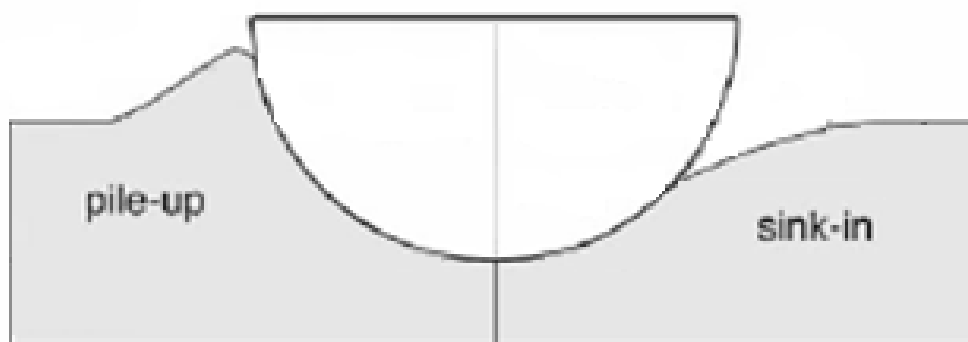
Um fator extremamente importante para a determinação de propriedades mecânicas em uma indentação é o dimensionamento da área de contato. Este dimensionamento pode ser influenciado pela formação indesejada de morfologias de impressão, o *pile-up* (formação de bordas) e o *sink-in* (retração) (CIPRIANO, 2008). Estas morfologias podem ser observadas nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 - Topografia de uma superfície exibindo (a) pile-up e (b) sink-in provocadas por penetrador esférico



Fonte: Cipriano, 2008

Figura 10 - Perfil de indentador esquematizando o pile-up e sink-in



Fonte: Taljat et al., 2004

As bordas de impressão se caracterizam pelo empilhamento do material ao redor da impressão quando se retira a ação da força aplicada no ensaio. Durante um ensaio de riscamento, o material ao redor da área de contato pode ser deformado ao longo do eixo onde a força é aplicada. Este comportamento dá origem às “bordas” ou “retrações”, que são afetadas pelas propriedades mecânicas do material, como o coeficiente de encruamento, módulo de elasticidade e tensão de escoamento (CIPRIANO, 2008).

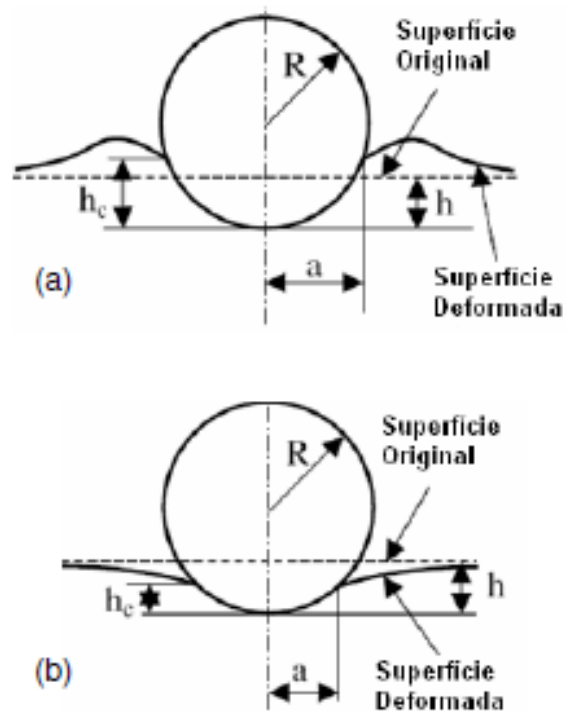
As bordas são formações ao longo do contorno da impressão e são comuns em materiais com baixo coeficiente de encruamento. O resultado do *pile-up* é um diâmetro maior da impressão, quando comparado com a impressão obtida sem o surgimento

destas bordas, gerando uma redução da dureza. A retração, ou *sink-in*, é caracterizada pela formação de um amassamento das bordas ao longo do contorno da calota esférica. Neste caso, o resultado é um diâmetro menor da impressão comparado com a impressão obtida sem o surgimento da retração. A consequência do *sink-in* é um aumento da dureza. A retração é comumente observada em materiais com coeficiente de encruamento elevado (CIPRIANO, 2008).

A geometria do indentador e a razão entre o módulo de escoamento e o módulo de elasticidade (σ_e/E) também são fatores que influenciam na formação de morfologia de impressões. Indentadores esféricos possuem uma tendência maior na formação de morfologias de impressão do que indentadores piramidais (XU, 2004). Para altas relações σ_e/E , não há a formação de *pile-up*, enquanto para baixas relações σ_e/E , a formação do *pile-up* passa a depender do coeficiente de encruamento (CIPRIANO, 2008).

Estudos envolvendo indentadores esféricos são realizados a fim de obter uma relação entre a formação de morfologias de impressão, de acordo com a Figura 11, obtiveram a equação (11) que determina o grau de formação de bordas e/ou retração (ψ) (CIPRIANO, 2008).

Figura 11 - Representação esquemática das bordas (a) e da retração (b) em uma indentação esférica



Fonte: Hernot et al, 2006

$$a^2 = 2 * \psi^2 * h * R \quad (11)$$

Sendo:

a o raio da impressão obtida;

h a profundidade máxima da penetração abaixo da superfície normal;

R o raio do penetrador.

Para valores de ψ^2 maiores que 1, a formação de bordas é a morfologia predominante, enquanto para ψ^2 menores que 1, a morfologia predominante é a retração (KUCHARSKI; MROZ, 2001).

2.5 ATRITO

O atrito é definido como uma força de resistência quando um corpo desliza sobre outro (ASM Metals Handbook, 1992). A força de atrito é relacionada com o carregamento normal entre superfícies de contato e o coeficiente de atrito (μ).

Há, também, outros elementos que influenciam a força de atrito, como a área de contato e a velocidade de deslizamento (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

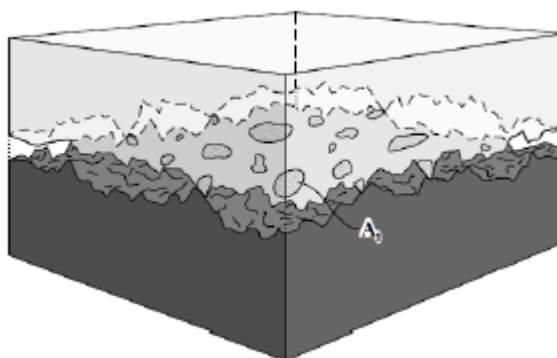
Segundo Dowson (1979), as duas primeiras leis do atrito, formuladas por Leonardo da Vinci, afirmam que:

- A força de atrito é diretamente proporcional à carga aplicada;
- A força de atrito é independente da área aparente de contato.

O coeficiente de atrito e o desgaste, nos processos de conformação dependem de três critérios. São eles: condições de trabalho, topografia dos corpos e materiais envolvidos (TABOR, 1956).

Como pode ser observado na Figura 12, a área de contato aparente é maior do que a área de contato real. A área real está relacionada com o carregamento normal e a topografia das superfícies (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

Figura 12 – Representação da área real de contato entre duas superfícies



Fonte: Stachoviak e Batchelor, 2001

Hamilton e Goodman, em 1966, realizaram uma análise cuidadosa do riscamento de um corpo homogêneo. Eles mostraram que, tanto a tensão de tração na borda de fuga, quanto a tensão de compressão na borda dianteira aumentavam se o atrito entre o penetrador e o revestimento fosse intensificado. Portanto, espera-se que o aumento do atrito leve a um aumento dessas tensões, o que estimulará a delaminação em substratos revestidos (BLESS et al., 2000).

Coghill et al. (1990) enfatiza o importante papel do atrito durante o ensaio de riscamento. Para três pontas de indentadores, cada uma constituída de um material e com raios de ponta distintos, a carga crítica resultante não poderia ser correlacionada ao respectivo raio da ponta.

Portanto, foi concluído que o atrito deveria ter um efeito significativo no resultado. A tendência observada é que a carga crítica aumenta à medida que o coeficiente de atrito diminui (BLESS et al., 2000).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Materiais das amostras e penetradores

Os materiais utilizados neste estudo são as ligas de aço inoxidável AISI 316L e a liga de níquel INCONEL 718. Estes materiais foram escolhidos devido a sua grande utilidade para a indústria de óleo & gás.

O material utilizado nos penetradores esféricos é metal duro. Estes foram comprados da empresa Só Esferas, localizada no município de São Paulo.

3.1.2 Propriedades dos materiais

O Coeficiente de Encruamento (n), a Tensão de Escoamento (σ_{esc}), a Tensão Limite de Resistência (σ_r) e o Módulo de Elasticidade (E), disponíveis na Tabela 1, foram determinadas por Cipriano, 2008 (AISI 316L) e Xavier, 2009 (INCONEL 718):

Tabela 1 – Propriedades do Aço Inoxidável 316L e da liga INCONEL 718

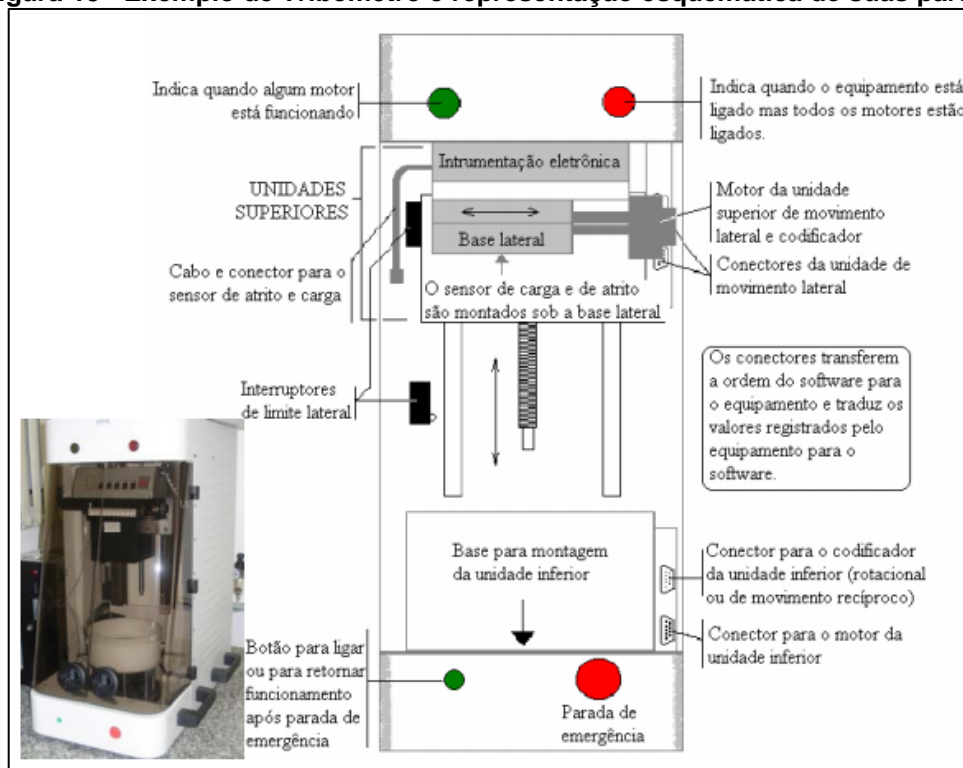
Propriedade	Aço Inoxidável 316L	Liga Inconel 718
n	0,48	0,20
σ_{esc} [MPa]	357	1138
σ_r [MPa]	634	1344
E [GPa]	211	215

3.2 TRIBÔMETRO

O equipamento tribômetro é utilizado para medição de propriedades de atrito e desgaste de combinações de materiais e lubrificantes sob condições específicas de carga, velocidade, temperatura e atmosfera. A caracterização tribológica envolve estudos sobre as reais condições de uso do material assim como o coeficiente de atrito, taxa de desgaste e durabilidade. Estes estudos podem ser aplicados em diversas áreas tais como automotiva, aeroespacial, eletrônica, biomédica e ótica (RADI *et al.*, 2007).

Um desenho esquemático deste equipamento pode ser observado na Figura 13.

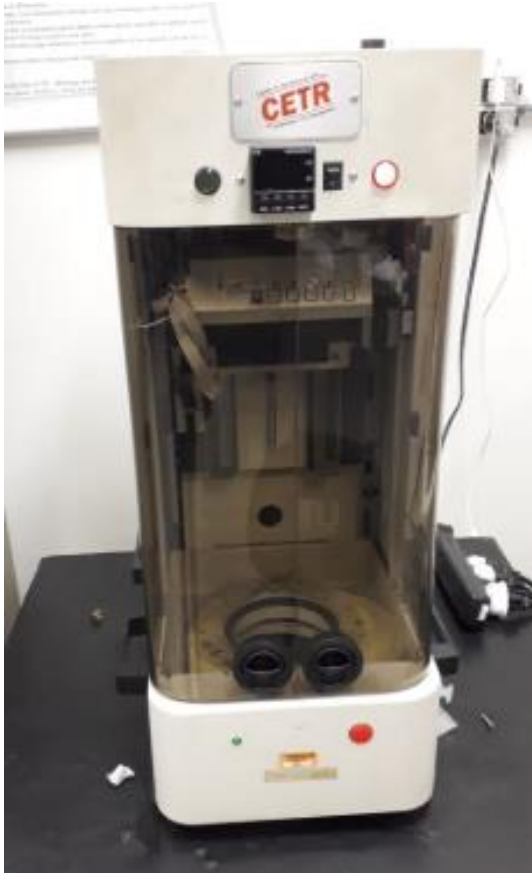
Figura 13 - Exemplo de Tribômetro e representação esquemática de suas partes



Fonte: Radi et al., 2007

Para a execução do teste de riscamento, foi utilizado o Tribômetro CETR – Tribology Test Equipment do Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Sede Ecoville (UTFPR), observado na Figura 14.

Figura 14 - Tribômetro CETR da UTFPR – Ecoville



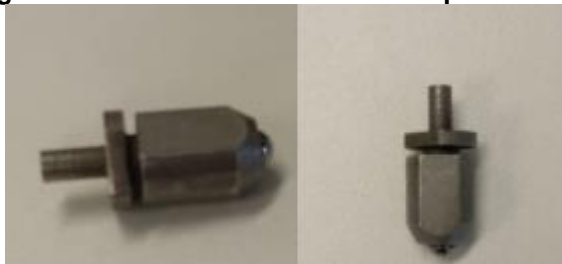
3.3 COMPONENTES E VARIÁVEIS DO ENSAIO

Os componentes e variáveis neste projeto foram definidos com o propósito de analisar o comportamento do aço inoxidável 316L e da liga INCONEL 718 em diferentes situações.

Para tal, foi estabelecido:

- Ferramenta: Ferramenta de metal duro esférica com 4 mm de diâmetro, como pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 - Imagens da ferramenta esférica com o porta-ferramenta



- Célula de carga: Célula de Carga de 0N – 10N do Tribômetro CETR da UTFPR, observada na Figura 16. A célula de carga opera com velocidades entre 0,001 a 10 mm/s. A resolução de posição do equipamento é de 50 nm.

Figura 16 – Célula de Carga do Tribômetro CETR da UTFPR – Ecoville com indentador esférico



- Comprimento da distância do risco: Duas pistas com comprimentos distintos: 2,5 mm e 5 mm;
- Material das amostras: Amostras de Aço Inoxidável 316L com rugosidade transversal média Ra de 0,156 μ m e 0,220 μ m de rugosidade longitudinal média Ra. O Inconel 718 apresentou rugosidade transversal média Ra de 0,524 μ m e 0,538 μ m de rugosidade longitudinal média Ra;
- Carregamento: 5 formas distintas de carregamento, como pode ser observado na Tabela 2:
 - Carregamento linear com carga inicial 2N e final 5N: Experimentos 1, 2, 3 e 4 (Ensaio A);
 - Carregamento linear com carga inicial 1N e final 6N: Experimentos 5, 6, 7 e 8 (Ensaio B);

- Carregamento estável a 2N seguido de carregamento em rampa até 5N: Experimentos 9, 10, 11 e 12 (Ensaio C);
- Carregamento linear com carga inicial 2N e final 5N seguido de carregamento em rampa a 5N: Experimentos 13, 14, 15 e 16 (Ensaio D);
 - Carregamento constante a 2N, seguido de carregamento em rampa até 5N e carregamento constante a 5N: Experimentos 17, 18, 19 e 20 (Ensaio E);
 - Os trechos com carga constante, nos Ensaios C, D e E representam 25%, respectivamente, da distância total do risco. Para trechos com 2,50mm de comprimento, a distância com carga constante é de 0,63mm e para trechos de 5,00mm é de 1,25mm.

Tabela 2 – Esquema de distribuição dos carregamentos nos ensaios

Ensaio	Nº Experimento	Penetrador	Amostra	Pista	Carregamento	Carga inicial	Carga Final	Ilustração do Carregamento
A	1	Esférico	316L	2,5mm	Linear	2N	5N	
	2	Esférico	316L	5,0mm	Linear	2N	5N	
	3	Esférico	INCONEL 718	2,5mm	Linear	2N	5N	
	4	Esférico	INCONEL 718	5,0mm	Linear	2N	5N	
B	5	Esférico	316L	2,5mm	Linear	1N	6N	
	6	Esférico	316L	5,0mm	Linear	1N	6N	
	7	Esférico	INCONEL 718	2,5mm	Linear	1N	6N	
	8	Esférico	INCONEL 718	5,0mm	Linear	1N	6N	
C	9	Esférico	316L	2,5mm	Constante - Rampa	2N	5N	
	10	Esférico	316L	5,0mm	Constante - Rampa	2N	5N	
	11	Esférico	INCONEL 718	2,5mm	Constante - Rampa	2N	5N	
	12	Esférico	INCONEL 718	5,0mm	Constante - Rampa	2N	5N	
D	13	Esférico	316L	2,5mm	Rampa - Constante	2N	5N	
	14	Esférico	316L	5,0mm	Rampa - Constante	2N	5N	
	15	Esférico	INCONEL 718	2,5mm	Rampa - Constante	2N	5N	
	16	Esférico	INCONEL 718	5,0mm	Rampa - Constante	2N	5N	
E	17	Esférico	316L	2,5mm	Constante - Rampa - Constante	2N	5N	
	18	Esférico	316L	5,0mm	Constante - Rampa - Constante	2N	5N	
	19	Esférico	INCONEL 718	2,5mm	Constante - Rampa - Constante	2N	5N	
	20	Esférico	INCONEL 718	5,0mm	Constante - Rampa - Constante	2N	5N	

A finalidade de cada conjunto de experimento foi:

- Ensaio A: Analisar o comportamento do ensaio partindo do repouso, com carga inicial de 2N e aumentando linearmente até 5N.
- Ensaio B: Analisar o comportamento do ensaio partindo do repouso, com carga inicial de 1N, aumentando linearmente a carga até 6N. O principal objetivo desta combinação é verificar o coeficiente de atrito a 2N e 5N com o indentador em movimento, uma vez que no Ensaio A, o indentador inicia e finaliza o ensaio com as cargas a 2N e em 5N.
- Ensaio C: Analisar o comportamento do ensaio partindo do repouso com carga de 2N, mantendo a força constante, a qual passa a ser incrementada até atingir o valor de 5N, quando é então retirada a carga. Esta combinação permite observar o comportamento com carga constante a 2N e a frenagem do indentador.
- Ensaio D: Analisar o comportamento partindo do repouso com carga de 2N, aumentando em rampa até a carga de 5N. Em sequência manteve-se constante a carga a 5N. Com isso, verifica-se a influência da aceleração e o comportamento sob carga constante de 5N.
- Ensaio E: Analisar o comportamento do ensaio partindo do repouso a 2N mantendo-o constante. Iniciando então um aumento da carga até 5N, e mantendo-a estável até o fim do ensaio. É possível observar, neste caso, o comportamento com cargas constantes e lineares no mesmo ensaio.

3.4 ENSAIO DE RISCAMENTO

3.4.1 Ensaios

Para a realização dos estudos de efeitos combinados na superfície do Aço inoxidável 316L e liga INCONEL 718, foi adotada a norma ASTM G171 (2017). Esta norma aborda os métodos para ensaios.

Para os experimentos determinou-se a velocidade como constante e de 0,17 mm/s. Cada ensaio de riscamento foi realizado duas vezes e, em casos de resultados discrepantes, ambos os experimentos foram refeitos. Antes dos experimentos, a fim de que as superfícies das amostras não influenciassem nos resultados, foi realizado um polimento das mesmas no laboratório da UTFPR com lixas em óxido de alumínio sobre costado de pano da marca Norton de grana de 100, 200, 400 e 800.

Foram realizados 20 experimentos, indicados na Tabela 2, nos quais variou-se o comprimento do risco (2,5mm e 5,0mm), o material da amostra (Inox 316L e INCONEL 718), a carga inicial e final (2N – 5N e 1N – 6N) e a forma de carregamento (linear e linear com cargas constantes).

Iniciando os ensaios, cada amostra foi individualmente fixada e nivelada no tribômetro. A célula de carga foi instalada no tribômetro e cada sequência de passos foi programado no computador do LASC. Após a realização de todos os ensaios no tribômetro, os resultados foram exportados em tabelas no Excel, onde foi possível obter curvas do Coeficiente de Atrito em função da distância percorrida (mm), exemplificada na Figura 17, e curvas do carregamento (Newton) pela distância percorrida (mm), observada na Figura 18. Para o desenvolvimento e análise das curvas dos ensaios, foram considerados os resultados de cada centésimo de segundo (0,01 segundo).

Figura 17 – Exemplo de gráfico do coeficiente de atrito versus distância percorrida em carregamento linear em ensaio de riscamento

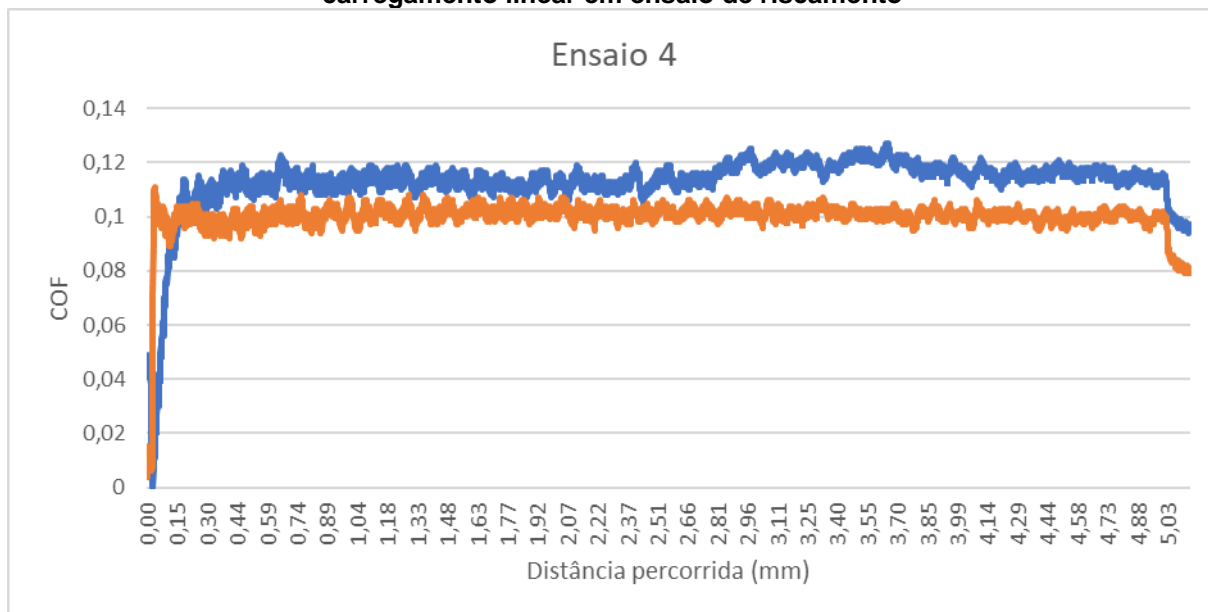
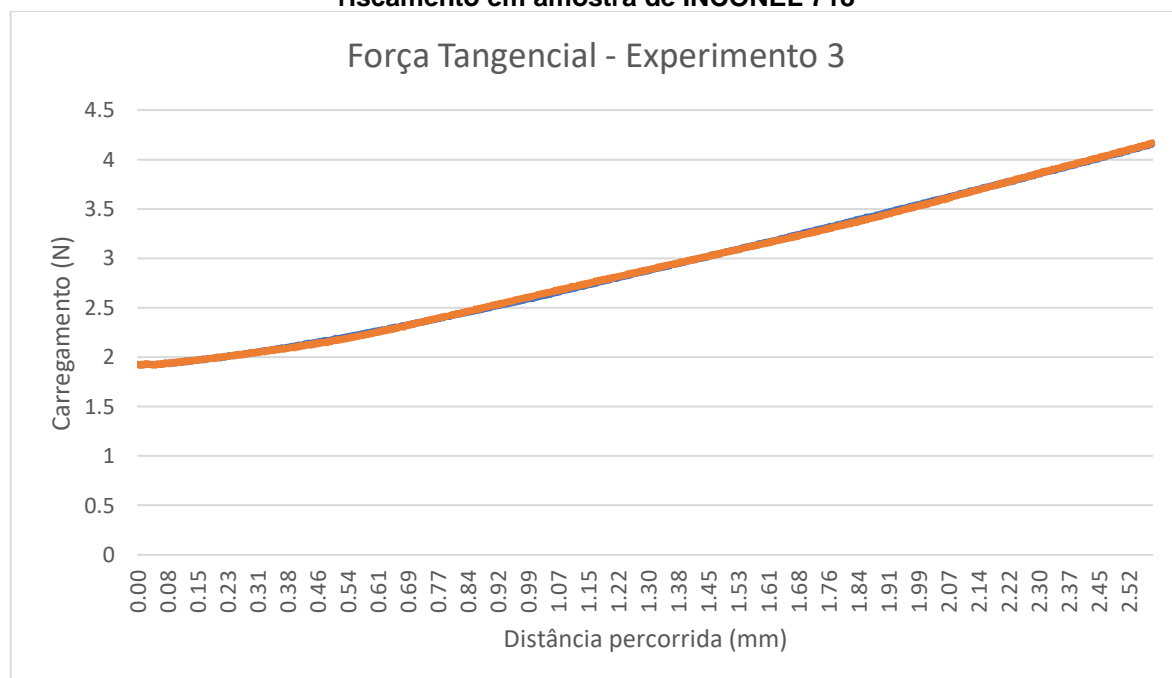


Figura 18 – Exemplo de gráfico do carregamento versus distância percorrida em ensaio de riscamento em amostra de INCONEL 718

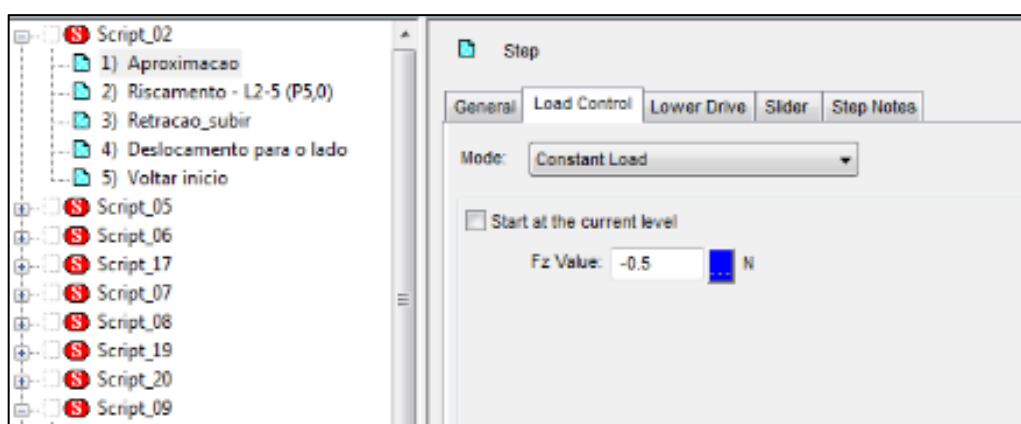


3.4.2 Scripts

Para definir todos os detalhes dos ensaios de riscamento, foi realizado a programação dos passos dos experimentos no software UMT do Tribômetro CETR no LASC – UTFPR Ecoville. O script consistia em:

- Aproximação: Determinação de uma carga inicial para reconhecimento do contato indentador e superfície da amostra. A Figura 19 mostra a configuração de uma carga de 0,5N;

Figura 19 – Determinação da Carga de Contato entre Indentador e Amostra



- Riscamento com carga constante: Determinação da carga a ser aplicada, distância do riscoe velocidade do ensaio, conforme é apresentado nas Figuras 20 e 21;

Figura 20 – Determinação da Carga durante carregamento constante

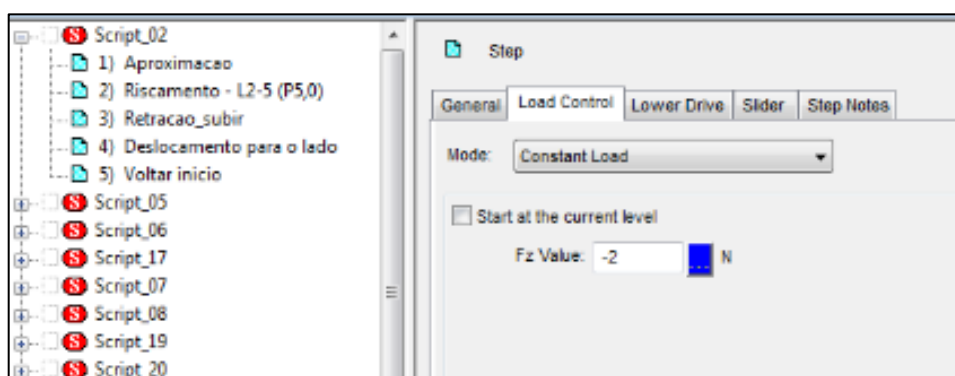
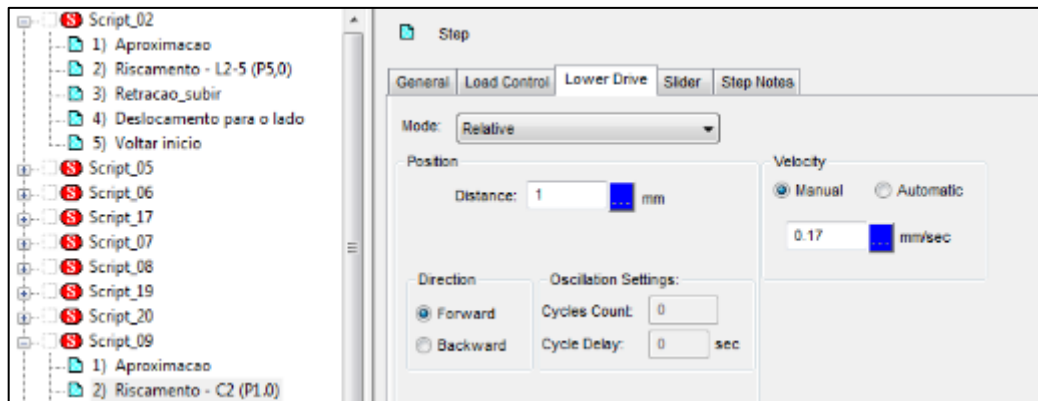
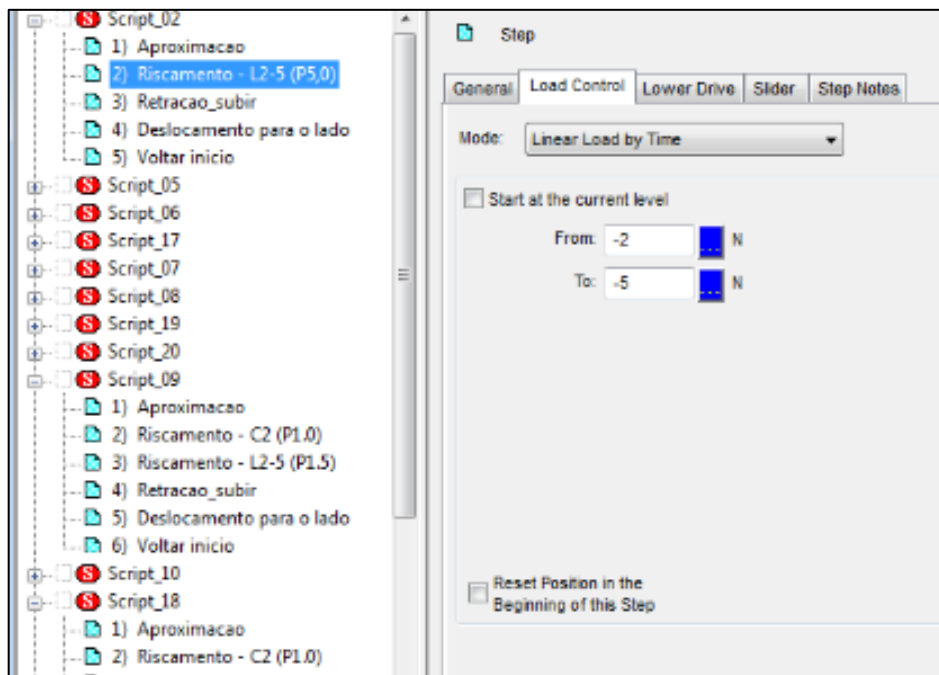


Figura 21 – Determinação da Distância e Velocidade do ensaio



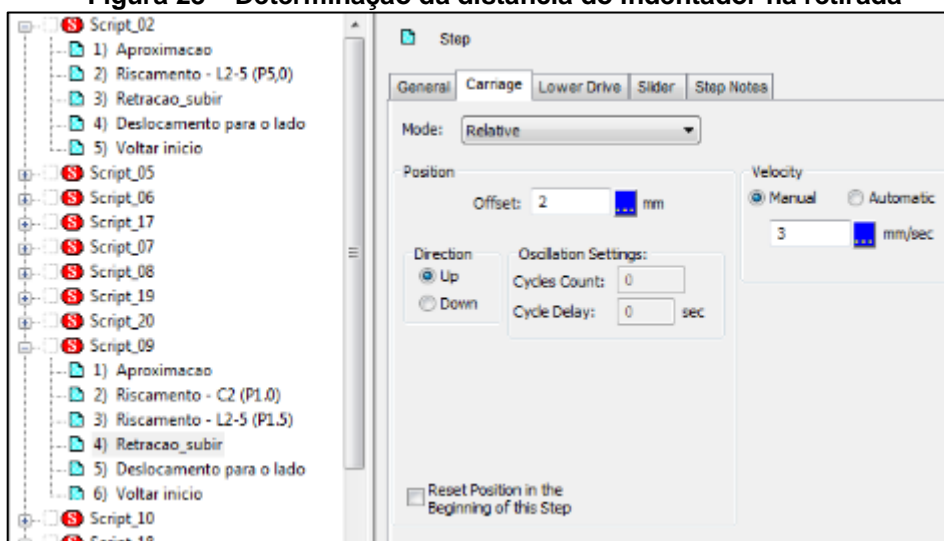
- Riscamento com carga em rampa: Definição das cargas iniciais e finais, juntamente com a distância do risco, como mostra a Figura 22:

Figura 22 – Determinação das Cargas Iniciais e Finais nos carregamentos em Rampa



- Retirada do Indentador: Definição da distância que o indentador se afastará da amostra após a realização do riscamento, como exemplificado na Figura 23.

Figura 23 – Determinação da distância do indetador na retirada



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentadas as análises dos ensaios de riscamento nas amostras de aço inox 316L e Inconel 718. Os gráficos de coeficiente de atrito pela distância percorrida, carregamento pela distância percorrida e taxa de carregamento pela distância percorrida estão localizados respectivamente nos anexos A, B e C.

É necessário ressaltar que está fora do escopo deste estudo, a avaliação e análise da dinâmica do trabalho. Os fatores analisados foram o coeficiente de atrito, a taxa de carregamento, o comprimento do risco e possíveis influências da aceleração e desaceleração.

Os valores do comprimento das pistas dos ensaios estão localizados na Tabela 3. Estes foram obtidos através da análise com microscópio, localizado na UTFPR e dos dados provindos do Tribômetro. A diferença máxima entre o comprimento de risco estabelecido e o atingido nos experimentos foi de até 35%. Os valores para cada experimento estão na Tabela 3. Os valores de comprimento de pista provindos do tribômetro e os observados pelo microscópio foram bem próximos, como pode ser também observado na Tabela 3.

Tabela 3 – Comprimento das Pistas dos Ensaios de Riscamento

Ensaio	Experimento	Amostra	Comprimento com dados do Microscópio (mm)	Comprimento com dados do Tribômetro (mm)	Diferença da Meta	Ilustração do Carregamento
A	1	316L	2,59	2,58	3,2%	
	2	316L	5,14	5,13	2,6%	
	3	Inconel 718	2,59	2,58	3,2%	
	4	Inconel 718	5,14	5,13	2,6%	
B	5	316L	3,39	3,37	34,8%	
	6	316L	6,15	6,13	22,6%	
	7	Inconel 718	3,06	3,06	22,4%	
	8	Inconel 718	4,66	4,66	-6,8%	
C	9	316L	3,13	3,14	25,6%	
	10	316L	5,05	5,03	0,6%	
	11	Inconel 718	3,24	3,24	29,6%	
	12	Inconel 718	6,02	6,00	20,0%	
D	13	316L	3,30	3,30	32,0%	
	14	316L	5,18	5,19	3,8%	
	15	Inconel 718	3,37	3,37	34,8%	
	16	Inconel 718	6,11	6,11	22,2%	
E	17	316L	3,22	3,22	28,8%	
	18	316L	6,74	6,75	35,0%	
	19	Inconel 718	3,37	3,37	34,8%	
	20	Inconel 718	6,55	6,59	31,8%	

A fim de facilitar as análises, as distâncias de comprimento de 5,00mm ou mais foram denominadas, no decorrer deste estudo, como “distâncias longas” e as de 2,5mm como “distâncias curtas”.

Dados referentes ao carregamento, às forças tangenciais, aos coeficientes de atrito e ao desvio padrão, de todos os experimentos podem ser vistos na Tabela 4. Para a obtenção destes valores, foram considerados todos os pontos dos ensaios, partindo do repouso até o final do experimento.

Tabela 4 – Comprimento de Pista, Carregamento, Forças Tangenciais e Coeficientes de Atrito dos Ensaios de Riscamento

Ensaio	Exp. n°	Amostra	Pista (mm)	Carregamento Inicial (N)	Carregamento Final (N)	Força Tangencial Final (N)	Força Tangencial Máxima (N)	Força Tangencial Média (N)	COF - Risco 1	COF - Risco 2	COF médio
A	1	316L	2,58	1,93	4,32	0,473	0,534	0,362	0,120	0,119	0,119
	2	316L	5,13	1,93	4,63	0,598	0,662	0,432	0,133	0,134	0,133
	3	Inconel 718	2,58	1,94	4,21	0,386	0,438	0,314	0,109	0,108	0,108
	4	Inconel 718	5,13	1,93	4,70	0,414	0,521	0,342	0,113	0,104	0,109
B	5	316L	3,37	0,93	5,40	0,701	0,701	0,403	0,129	0,127	0,128
	6	316L	6,13	0,92	5,73	0,726	0,726	0,417	0,129	0,123	0,126
	7	Inconel 718	3,06	0,94	5,21	0,676	0,676	0,380	0,122	0,127	0,125
	8	Inconel 718	4,66	0,93	4,80	0,560	0,658	0,368	0,130	0,131	0,131
C	9	316L	3,14	1,93	4,46	0,653	0,653	0,354	0,128	0,124	0,126
	10	316L	5,03	1,94	4,82	0,616	0,688	0,415	0,139	0,139	0,139
	11	Inconel 718	3,24	1,91	4,67	0,725	0,730	0,501	0,159	0,153	0,156
	12	Inconel 718	6,00	1,94	4,76	0,506	0,606	0,358	0,116	0,112	0,114
D	13	316L	3,30	1,92	5,00	0,772	0,873	0,501	0,149	0,150	0,150
	14	316L	5,19	1,94	4,98	0,779	0,864	0,542	0,193	0,138	0,145
	15	Inconel 718	3,37	1,92	4,98	0,755	0,813	0,522	0,155	0,153	0,154
	16	Inconel 718	6,11	1,94	4,97	0,590	0,711	0,468	0,131	0,128	0,130
E	17	316L	3,22	1,92	4,99	0,716	0,782	0,350	0,121	0,100	0,111
	18	316L	6,75	1,91	4,99	0,989	1,001	0,558	0,169	0,158	0,164
	19	Inconel 718	3,37	1,92	4,96	0,857	0,889	0,451	0,148	0,148	0,148
	20	Inconel 718	6,59	1,9	5,05	0,747	0,760	0,476	0,131	0,150	0,140

4.1 RESULTADOS ENSAIO A

Analisando os dados deste ensaio, foi possível observar que as amostras de 316L apresentam coeficientes de atrito superiores a 10% aos que foram observados na amostra de Inconel para ambas as distâncias. Verificou-se, também, que, para as distâncias longas, os coeficientes de atrito foram superiores aos obtidos nos ensaios com distâncias curtas. É necessário atentar-se ao fato de os coeficientes de atrito, para a amostra de Inconel 718, alcançaram valores muito próximos.

Considerando as forças tangenciais dos ensaios foi observado que os valores obtidos nos ensaios de aço Inconel 316L foram superiores aos da amostra de Inconel 718 em ambas as distâncias. Outra característica encontrada foi que as forças tangenciais das distâncias longas foram superiores às das distâncias curtas em ambos os materiais, ratificando os dados do coeficiente de atrito, pois este está intrinsecamente ligado às forças tangenciais.

Constatou-se que nas distâncias de 5,00 mm, os ensaios apresentaram maiores oscilações.

Com relação à taxa de carregamento, era esperado uma taxa de carregamento constante pois trata-se de carregamento uniforme para os quatro ensaios deste grupo. Percebeu-se, porém, instabilidade, iniciando-se com valores diferentes dos finais. O ensaio A também foi o que apresentou maior diferença entre os dois ensaios realizados para cada script.

Um fato relevante neste ensaio foi de que houve influência da frenagem nos experimentos de Inconel 718. Esta influência ocorreu nos últimos 0,05mm e 0,08mm das distâncias curtas e longas, respectivamente. Tal fenômeno não foi observado nos ensaios na amostra de 316L.

4.2 RESULTADOS ENSAIO B

Apesar de não ter atingido a carga máxima em 6N, os valores dos coeficientes de atrito no Ensaio B apresentaram uma variação muito pequena entre os experimentos. Observou-se, também, que os resultados nas amostras apresentaram comportamentos opostos: O coeficiente de atrito médio do aço 316L diminuiu 1,5%

com o aumento da distância, enquanto o coeficiente de atrito médio de Inconel 718 aumentou 4,8% com o aumento da distância. Devido a esta variação ser muito pequena, uma possível explicação é a própria imprecisão do tribômetro nas casas centesimais.

Os resultados relacionados às forças tangenciais apresentam comportamentos distintos em cada material. Nos experimentos em aço inox 316L, as forças tangenciais médias, finais e máximas foram maiores na distância longa. Nos Experimentos 7 e 8, com a amostra de Inconel 718, o aumento da distância resultou em uma redução nos resultados em todas as forças tangenciais.

Analisando a oscilação e estabilidade dos ensaios, somente o Experimento 8 apresentou uma oscilação visível no coeficiente de atrito. Os outros experimentos foram estáveis e sem oscilações.

Observando a taxa de carregamento e, assim como no Ensaio A, também era esperado uma taxa de carregamento constante, porém houveram oscilações nas taxas.

Não foi observado, em nenhum experimento, alterações no coeficiente de atrito relacionado à frenagem do indentador.

4.3 RESULTADOS ENSAIO C

Os valores dos coeficientes de atrito no Ensaio C apresentaram um comportamento oposto ao do Ensaio B: O coeficiente de atrito médio do aço 316L foi maior com a distância longa, enquanto o maior coeficiente de atrito médio de Inconel 718 foi com a distância curta.

O comportamento da força tangencial acompanhou o do coeficiente de atrito: A amostra de aço inoxidável 316L apresentou uma força tangencial média superior no experimento com distância longa. Em Inconel, a distância curta obteve uma força tangencial média superior à distância longa. Verificou-se que os experimentos com maiores forças tangenciais apresentaram os maiores coeficientes de atrito.

A oscilação e estabilidade dos ensaios em Aço 316L foi muito mais presente do que em Inconel 718.

As taxas de carregamento para este grupo apresentaram comportamentos próximos do previsto. Com exceção ao experimento 11, que teve início com uma alta

taxa, os demais ensaios começaram com taxas próximas a zero e conforme o decorrer tiveram seus valores aumentados.

Não foi observado, em nenhum experimento, alterações no coeficiente de atrito relacionado à frenagem do indentador.

4.4 RESULTADOS ENSAIO D

Ao comparar do coeficiente de atrito nos quatro experimentos deste ensaio, foi possível observar que nos experimentos em 316L e Inconel 718 o coeficiente de atrito médio aumentou com a redução da distância.

O comportamento da força tangencial foi similar em ambos os materiais: Houve redução na força com o aumento da distância. A redução foi de 1% em 316L e 12,5% em Inconel 718.

Verificou-se que os experimentos com maiores forças tangenciais apresentaram os maiores coeficiente de atrito. Tais resultados são esperados, pois o coeficiente de atrito está intrinsecamente ligado às forças tangenciais.

Os Experimentos 13, 14 e 15 apresentaram saltos nos carregamentos entre 4,8N para 5,0N. Tal comportamento ocorreu devido à instabilidade do tribômetro na distribuição da carga em pequenas distâncias e não influenciou de modo relevante os resultados do coeficiente de atrito.

Quanto à taxa de carregamento, os experimentos 13 e 15 (distâncias curtas) apresentaram resultados próximos. Os ensaios 14 e 16 (distâncias longas) tiveram seus estágios finais próximos a zero, tendo em vista que a parte final do ensaio é constante em 5,0N, não apresentando variação.

Não foi observado, em nenhum experimento, alterações no coeficiente de atrito relacionado à frenagem do indentador.

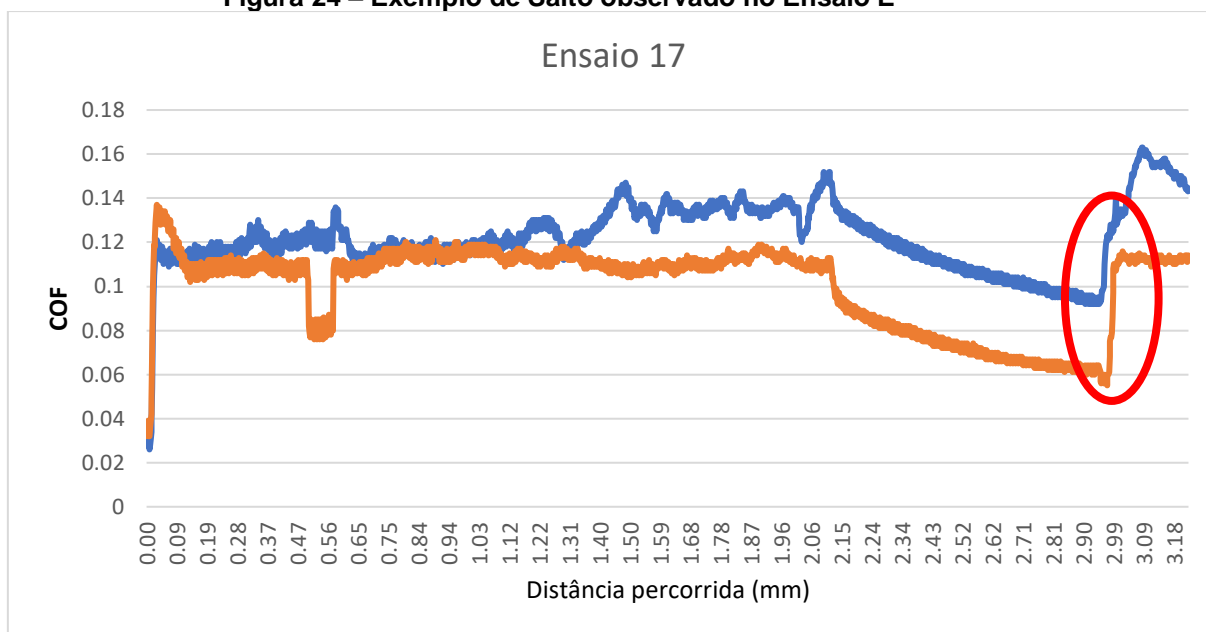
4.5 RESULTADOS ENSAIO E

O comportamento da oscilação do coeficiente de atrito no Ensaio E foi similar ao do Ensaio D. O maior coeficiente do aço 316L foi com a distância maior e o de Inconel ocorreu na distância menor.

As forças tangenciais do ensaio mostraram um padrão discrepante neste estudo. No aço 316L, os maiores valores foram observados na distância longa; na amostra de Inconel 718, as maiores forças tangenciais finais e máximas ocorreram na distância menor, enquanto a maior força tangencial média ocorreu na distância longa.

Este ensaio exibiu os comportamentos mais anômalos nos coeficientes de atrito do estudo. Os experimentos 17, 19 e 20 tiveram faixas de queda contínua do coeficiente, sendo seguidas de um salto, como pode ser visto na Figura 24. A queda foi considerada como consequência de um provável deslizamento do indentador. O aumento abrupto ocorreu exatamente no ponto em que o tribômetro configurou o carregamento para 5,0N. Como o equipamento possui suas limitações técnicas, não foi possível fazer uma transição contínua entre a rampa e o trecho com carregamento estável em todos os experimentos.

Figura 24 – Exemplo de Salto observado no Ensaio E

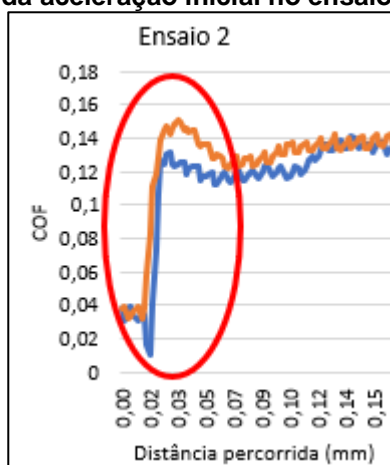


Em relação à taxa de carregamento, os experimentos apresentaram resultados heterogêneos. Não foi observado, em nenhum experimento, alterações no coeficiente de atrito relacionado à frenagem do indentador.

4.6 EFEITO DA ACELERAÇÃO

Foi observado, nos experimentos do Ensaio A, um salto abrupto do coeficiente de atrito no início do risco. Tal fenômeno, observado nos primeiros milímetros de distância, ocorreu devido ao início da aceleração no ensaio. Como pode ser observado na Figura 25, a velocidade inicial fez com que o coeficiente de atrito saia de 0 e atingisse valores superiores a 0,1 em trechos menores que 0,05 mm (2% do comprimento de distâncias curtas e 1% do tamanho de distâncias longas), ou seja, um aumento considerável em pequenas distâncias.

Figura 25 – Efeito da aceleração inicial no ensaio de riscamento



Como pode ser visto nos Apêndices A, a utilização de combinações nos carregamentos (Ensaio B, C, D e E) não alterou esta condição. Em todos os 20 experimentos o coeficiente de atrito teve um salto abrupto nos primeiros centésimos de milímetros e, em alguns casos específicos, o valor do coeficiente de atrito atingido neste salto abrupto ultrapassou os valores seguintes.

As Tabelas 5 e 6 apresentam os valores de coeficiente de atrito e forças tangenciais em dois casos: considerando e desconsiderando o efeito da aceleração, respectivamente.

Tabela 5 – Comparação dos dados obtidos das forças tangenciais considerando e não considerando o Efeito da Aceleração

Ensaio	Exp. n°	Amostra	Pista (mm)	Considerando Aceleração				Desconsiderando Aceleração				Ilustração do Carregamento
				Força Tangencial Final (N)	Força Tangencial Máxima (N)	Força Tangencial Média (N)	Força Tangencial Média (N)	Força Tangencial Final (N)	Força Tangencial Máxima (N)	Força Tangencial Média (N)		
A	1	316L	2,58	0,473	0,534	0,362	0,362	0,473	0,534	0,374		
	2	316L	5,13	0,598	0,662	0,432	0,432	0,598	0,662	0,442		
	3	Income 718	2,58	0,386	0,438	0,314	0,314	0,386	0,438	0,324		
	4	Income 718	5,13	0,414	0,521	0,342	0,342	0,414	0,521	0,355		
B	5	316L	3,37	0,701	0,701	0,403	0,403	0,701	0,701	0,413		
	6	316L	6,13	0,726	0,726	0,417	0,417	0,726	0,726	0,425		
	7	Income 718	3,06	0,676	0,676	0,380	0,380	0,676	0,676	0,393		
	8	Income 718	4,66	0,560	0,658	0,368	0,368	0,560	0,658	0,371		
C	9	316L	3,14	0,653	0,653	0,354	0,354	0,653	0,653	0,366		
	10	316L	5,03	0,616	0,688	0,415	0,415	0,616	0,688	0,427		
	11	Income 718	3,24	0,725	0,730	0,501	0,501	0,725	0,730	0,516		
	12	Income 718	6,00	0,506	0,606	0,358	0,358	0,506	0,606	0,368		
D	13	316L	3,30	0,772	0,873	0,501	0,501	0,772	0,873	0,514		
	14	316L	5,19	0,779	0,864	0,542	0,542	0,779	0,864	0,558		
	15	Income 718	3,37	0,755	0,813	0,522	0,522	0,755	0,813	0,540		
	16	Income 718	6,11	0,590	0,711	0,468	0,468	0,590	0,711	0,487		
E	17	316L	3,22	0,716	0,782	0,350	0,350	0,716	0,782	0,360		
	18	316L	6,75	0,989	1,001	0,558	0,558	0,989	1,001	0,710		
	19	Income 718	3,37	0,857	0,889	0,451	0,451	0,857	0,889	0,467		
	20	Income 718	6,59	0,747	0,760	0,476	0,476	0,747	0,760	0,489		

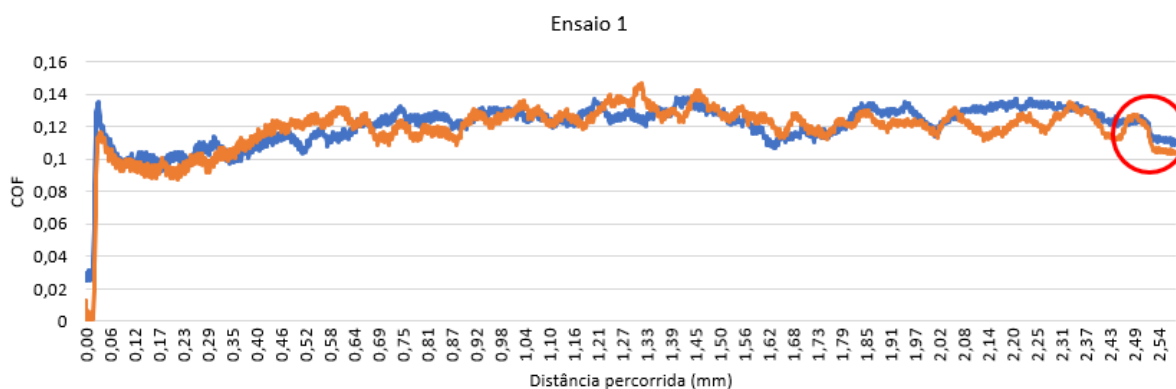
Tabela 6 – Comparação dos dados obtidos do coeficiente de atrito considerando e não considerando o Efeito da Aceleração

Ensaio	Experimento	Amostra	Comprimento da ranhura (mm)	Considerando Aceleração				Não Considerando Aceleração				Ilustração do Carregamento			
				COF - Risco 1	Desvio Padrão 1	COF - Risco 2	Desvio Padrão 2	COF médio	COF - Risco 1	Desvio Padrão 1	COF - Risco 2		Desvio Padrão 2	COF médio	
A	1	316L	2,58	0,120	0,0154	0,119	0,0132	0,119	0,0132	0,119	0,0113	0,120	0,0106	0,120	
	2	316L	5,13	0,133	0,0095	0,134	0,0072	0,133	0,0072	0,133	0,0078	0,134	0,0031	0,133	
	3	Inconel 718	2,58	0,109	0,0071	0,108	0,0082	0,108	0,0082	0,108	0,0021	0,108	0,0080	0,108	
	4	Inconel 718	5,13	0,113	0,0119	0,104	0,0076	0,109	0,0076	0,109	0,0031	0,104	0,0055	0,109	
B	5	316L	3,37	0,129	0,0089	0,127	0,0124	0,128	0,0124	0,128	0,0041	0,129	0,0067	0,129	
	6	316L	6,13	0,129	0,0085	0,123	0,0087	0,126	0,0087	0,126	0,0046	0,124	0,0032	0,127	
	7	Inconel 718	3,06	0,122	0,0059	0,127	0,0063	0,125	0,0063	0,125	0,0039	0,127	0,0035	0,125	
	8	Inconel 718	4,66	0,130	0,0117	0,131	0,0090	0,131	0,0090	0,131	0,0114	0,132	0,0082	0,130	
C	9	316L	3,14	0,150	0,0164	0,125	0,0125	0,138	0,0125	0,138	0,0122	0,126	0,0117	0,126	
	10	316L	5,03	0,153	0,006	0,138	0,0107	0,145	0,0107	0,145	0,0057	0,139	0,0072	0,139	
	11	Inconel 718	3,24	0,159	0,0115	0,153	0,0105	0,156	0,0105	0,156	0,0099	0,155	0,0095	0,157	
	12	Inconel 718	6,00	0,116	0,0126	0,112	0,0111	0,114	0,0111	0,114	0,0085	0,112	0,0061	0,115	
D	13	316L	3,30	0,149	0,0157	0,150	0,0161	0,150	0,0161	0,150	0,0119	0,151	0,0134	0,150	
	14	316L	5,19	0,193	0,0141	0,192	0,0137	0,192	0,0137	0,192	0,0121	0,139	0,0100	0,145	
	15	Inconel 718	3,37	0,155	0,0128	0,153	0,0102	0,154	0,0102	0,154	0,0106	0,154	0,0091	0,155	
	16	Inconel 718	6,11	0,131	0,0093	0,128	0,0118	0,130	0,0118	0,130	0,0088	0,128	0,0095	0,131	
E	17	316L	3,22	0,121	0,0159	0,100	0,0192	0,111	0,0192	0,111	0,014	0,099	0,0163	0,111	
	18	316L	6,75	0,301	0,0227	0,310	0,0161	0,305	0,0161	0,305	0,0209	0,159	0,0143	0,165	
	19	Inconel 718	3,37	0,148	0,0183	0,148	0,0172	0,148	0,0172	0,148	0,0166	0,151	0,0155	0,150	
	20	Inconel 718	6,59	0,131	0,0237	0,150	0,0245	0,140	0,0245	0,140	0,0202	0,150	0,0214	0,141	

4.7 EFEITO DA DESACELERAÇÃO

Nos últimos 0,1mm de distância dos experimentos do Ensaio A, foi observado uma queda contínua no coeficiente de atrito. Tal fato, exemplificado na Figura 26, aconteceu devido à frenagem do indentador. Ao reduzir sua velocidade, o indentador reduziu o carregamento, o que levou a uma queda no coeficiente de atrito.

Figura 26 – Efeito da desaceleração inicial no ensaio de riscamento



A utilização de formas alternativas no carregamento como o prolongamento da rampa (Ensaio B) e a utilização de cargas estáveis após a rampa (Ensaio D e E) atenuou e extinguiu esta redução no coeficiente de atrito. Logo, este efeito é contornável com a aplicação diferenciada de carga no final do ensaio.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os valores do coeficiente de atrito médio e força tangencial considerando e não considerando o efeito da aceleração e da desaceleração.

Tabela 7 – Comparação dos dados obtidos das forças tangenciais considerando e não considerando o Efeito da Desaceleração

Ensaio	Exp. n°	Amostra	Pista (mm)	Considerando Desaceleração				Desconsiderando Desaceleração				Ilustração do Carregamento
				Força Tangencial Final (N)	Força Tangencial Máxima (N)	Força Tangencial Média (N)	Força Tangencial Final (N)	Força Tangencial Máxima (N)	Força Tangencial Média (N)			
A	1	316L	2,58	0,473	0,534	0,362	0,512	0,534	0,364			
	2	316L	5,13	0,598	0,662	0,432	0,635	0,662	0,438			
	3	Inconel 718	2,58	0,386	0,438	0,314	0,435	0,438	0,316			
	4	Inconel 718	5,13	0,414	0,521	0,342	0,509	0,521	0,345			
B	5	316L	3,37	0,701	0,701	0,403	0,701	0,701	0,413			
	6	316L	6,13	0,726	0,726	0,417	0,726	0,726	0,425			
	7	Inconel 718	3,06	0,676	0,676	0,380	0,676	0,676	0,393			
	8	Inconel 718	4,66	0,560	0,658	0,368	0,560	0,658	0,371			
C	9	316L	3,14	0,653	0,653	0,354	0,653	0,653	0,366			
	10	316L	5,03	0,616	0,688	0,415	0,616	0,688	0,427			
	11	Inconel 718	3,24	0,725	0,730	0,501	0,725	0,730	0,516			
	12	Inconel 718	6,00	0,506	0,606	0,358	0,506	0,606	0,368			
D	13	316L	3,30	0,772	0,873	0,501	0,772	0,873	0,514			
	14	316L	5,19	0,779	0,864	0,542	0,779	0,864	0,558			
	15	Inconel 718	3,37	0,755	0,813	0,522	0,755	0,813	0,540			
	16	Inconel 718	6,11	0,590	0,711	0,468	0,590	0,711	0,487			
E	17	316L	3,22	0,716	0,782	0,350	0,716	0,782	0,360			
	18	316L	6,75	0,989	1,001	0,558	0,989	1,001	0,710			
	19	Inconel 718	3,37	0,857	0,889	0,451	0,857	0,889	0,467			
	20	Inconel 718	6,59	0,747	0,760	0,476	0,747	0,760	0,489			

Tabela 8 – Comparação dos dados obtidos do coeficiente de atrito considerando e não considerando o Efeito da Desaceleração

Ensaio	Experimento	Amostra	Comprimento da ranhura (mm)	Considerando Desaceleração				Não Considerando Desaceleração				Ilustração do Carregamento			
				COF - Risco 1	Desvio Padrão 1	COF - Risco 2	Desvio Padrão 2	COF médio	COF - Risco 1	Desvio Padrão 1	COF - Risco 2		Desvio Padrão 2	COF médio	
A	1	316L	2,58	0,120	0,1542	0,119	0,1322	0,119	0,1322	0,122	0,0098	0,121	0,0104	0,121	
	2	316L	5,13	0,133	0,0095	0,134	0,0072	0,133	0,0072	0,134	0,0068	0,134	0,0044	0,134	
	3	Inconel 718	2,58	0,109	0,0071	0,108	0,0082	0,108	0,0082	0,110	0,0039	0,108	0,0055	0,109	
	4	Inconel 718	5,13	0,113	0,0119	0,104	0,0076	0,109	0,0076	0,115	0,0048	0,105	0,0061	0,110	
B	5	316L	3,37	0,129	0,0089	0,127	0,0124	0,128	0,0124	0,129	0,0089	0,127	0,0124	0,128	
	6	316L	6,13	0,129	0,0085	0,123	0,0087	0,126	0,0087	0,129	0,0085	0,123	0,0087	0,126	
	7	Inconel 718	3,06	0,122	0,0059	0,127	0,0063	0,125	0,0063	0,122	0,0059	0,127	0,0063	0,125	
	8	Inconel 718	4,66	0,130	0,0117	0,131	0,0090	0,131	0,0090	0,130	0,0117	0,131	0,0090	0,131	
C	9	316L	3,14	0,150	0,0164	0,125	0,0125	0,138	0,0125	0,150	0,0164	0,125	0,0125	0,138	
	10	316L	5,03	0,153	0,006	0,138	0,0107	0,145	0,0107	0,153	0,006	0,138	0,0107	0,145	
	11	Inconel 718	3,24	0,159	0,0115	0,153	0,0105	0,156	0,0105	0,159	0,0115	0,153	0,0105	0,156	
	12	Inconel 718	6,00	0,116	0,0126	0,112	0,0111	0,114	0,0111	0,116	0,0126	0,112	0,0111	0,114	
D	13	316L	3,30	0,149	0,0157	0,150	0,0161	0,150	0,0161	0,149	0,0157	0,150	0,0161	0,150	
	14	316L	5,19	0,193	0,0141	0,192	0,0137	0,192	0,0137	0,193	0,0141	0,192	0,0137	0,192	
	15	Inconel 718	3,37	0,155	0,0128	0,153	0,0102	0,154	0,0102	0,155	0,0128	0,153	0,0102	0,154	
	16	Inconel 718	6,11	0,131	0,0093	0,128	0,0118	0,130	0,0118	0,131	0,0093	0,128	0,0118	0,130	
E	17	316L	3,22	0,121	0,0159	0,100	0,0192	0,111	0,0192	0,121	0,0159	0,100	0,0192	0,111	
	18	316L	6,75	0,301	0,0227	0,310	0,0161	0,305	0,0161	0,301	0,0227	0,310	0,0161	0,305	
	19	Inconel 718	3,37	0,148	0,0183	0,148	0,0172	0,148	0,0172	0,148	0,0183	0,148	0,0172	0,148	
	20	Inconel 718	6,59	0,131	0,0237	0,150	0,0245	0,140	0,0245	0,131	0,0237	0,150	0,0245	0,140	

Somente houve mudanças nos dados do Ensaio A, pois todos os outros Ensaio mitigaram este efeito com a variação do carregamento.

Analisando as Forças Tangenciais, é observado um aumento considerável na Força Tangencial Final e um leve aumento na Força Média ao desconsiderar a desaceleração. Houve também, neste cenário, um leve aumento nos coeficientes de atrito.

4.8 CONCLUSÕES

Deste estudo foi possível concluir que:

- O efeito da aceleração não pôde ser atenuado em nenhuma combinação de carregamento, material da amostra e/ou distância.

- O efeito da desaceleração, ao contrário da aceleração, pôde ser reduzido e subtraído com a utilização de diferentes formas de carregamento. Ao aplicar carregamentos múltiplos: cargas estáveis com cargas com aumento linear (Ensaio C, D e E), este fenômeno foi eliminado.

- A variação da distância sem a variação do carregamento não influenciou na redução do efeito da desaceleração.

- Os efeitos da aceleração e desaceleração, apesar de presentes nos experimentos, possuem pequena influência nas forças tangenciais e no coeficiente de atrito do experimento como um todo, variando somente nas casas centesimais destas grandezas.

- A variação de comprimentos da distância não influencia o coeficiente de atrito em experimentos de mesmo material de amostra com carregamento com aumento linear (Ensaio A e B).

- A utilização de carregamento com aumento linear não tornou a taxa de carregamento constante. Principal causa desta oscilação é a imprecisão do tribômetro utilizado.

- A aplicação de cargas estáveis e cargas com aumentos lineares (Ensaio C, D e E) em distâncias curtas (2,5 mm) geram maiores coeficientes de atrito e maiores forças tangenciais em Inconel 718 do que em aço Inox 316L.

- A aplicação de cargas constante e cargas com aumentos lineares (Ensaio C, D e E) em distâncias longas (5,0 mm) geram maiores coeficientes de atrito e maiores forças tangenciais em 316L do que em Inconel.

- A utilização de cargas com aumento linear (Ensaio A e B) geram maiores forças tangenciais no aço inoxidável 316L em qualquer comprimento de risco.

- As etapas programadas não foram reproduzidas pelo equipamento.

REFERÊNCIAS

ASM METALS HANDBOOK 1992, Volume 18, **Friction, Lubrication and Wear Technology**, ASM International (American Society for Metals), Materials Park, Ohio, USA, 1992. p. 12, 340-347, 823.

ASTM G171: **Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus**. 3 ed. West Conshohocken: ASTM International, 2009.

BLESS, M. H.; WINKELMAN, G. B.; BALKENEDE, A. R.; DEN TOONDER, J. M. J. **The Effect of Friction on Scratch Adhesion Testing: Application to a Sol-Gel Coating on Polypropylene**. Philips Research Laboratories Eindhoven, 2000.

BUTTERY, T. C.; ARCHARD, J. F. **Grinding and Abrasive Wear**. University of Leicester, 1969.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CIPRIANO, G. L. **Determinação do Coeficiente de Encruamento de Metais Através da Morfologia das Impressões de Dureza na Escala Macroscópica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008.

COGHILL, M. D. E.; STJOHN, D. H. **Scratch Adhesion Testing of Soft Metallic Coatings on Glass**. Comalco Research Centre, Thomas Town, Victoria, 1990.

CORREA, E. C. S. **Aspectos do Encruamento de Metais Previamente Deformados a Frio**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

DIETER, G. E. **Metallurgy and Metallurgical Engineering Series**. Drezel Institute of Technology, Philadelphia 1961.

DOWSON, D. **History of tribology**. London: Longman, 1979.

GARRISON, W. M. **Abrasive Wear Resistance: The Effects of Ploughing and The Removal of Ploughed Material**. Department of Metallurgical Engineering and Materials Science, Carnegic-Mellon University, Pittsburgh, 1986

HERNOT, X., BARTIER, O., BEKOUICHE, Y., EL ABDI, R., MAUVOISIN, G. **Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation International**. Journal of Solids and Structures, Vol. 43, 2006, p. 4136–4153.

KUCHARSKI, S.; MRÓZ, Z. **Indentation of plastic hardening parameters of metals from spherical indentation tests**. Materials Science and Engineering A, nº 318, p. 65-76, 2001.

LIRA, C.; ALARCON, O. E. **Seleção de esmaltes cerâmicos utilizando um delineamento experimental segundo Taguchi**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

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

MIKOWSKI, A. **Propriedades Nanomecânicas e Processos de Fratura de Materiais Lamelares**. Tese (Doutorado em Física) – Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, 2008.

PINTAUDE, G. **Análise dos Regimes Moderado e Severo de Desgaste Abrasivo utilizando Ensaios Instrumentados de Dureza**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

RADI, P. A.; SANTOS, L. V.; BONETTI, L. F.; TRAVA-AIROLDI, V. J. **Tribologia, Conceitos e Aplicações**. Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA-XIII ENCITA/2007, 2007

SOUZA, S. A. **Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5 ed. Editora Edgard Blucher LTDA, 1982.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. Butterworth-Heinemann, 2001.

TALJAT, B.; PHARR, G. M. **Development of pile-up during spherical indentation of elastic-plastic solids.** International Journal of Solids and Structures, Vol 41, Issue 14, 2004.

TABOR, D. **The Physical Meaning of Indentation and Scratch Hardness.** Department of Physical Chemistry, University of Cambridge, 1956.

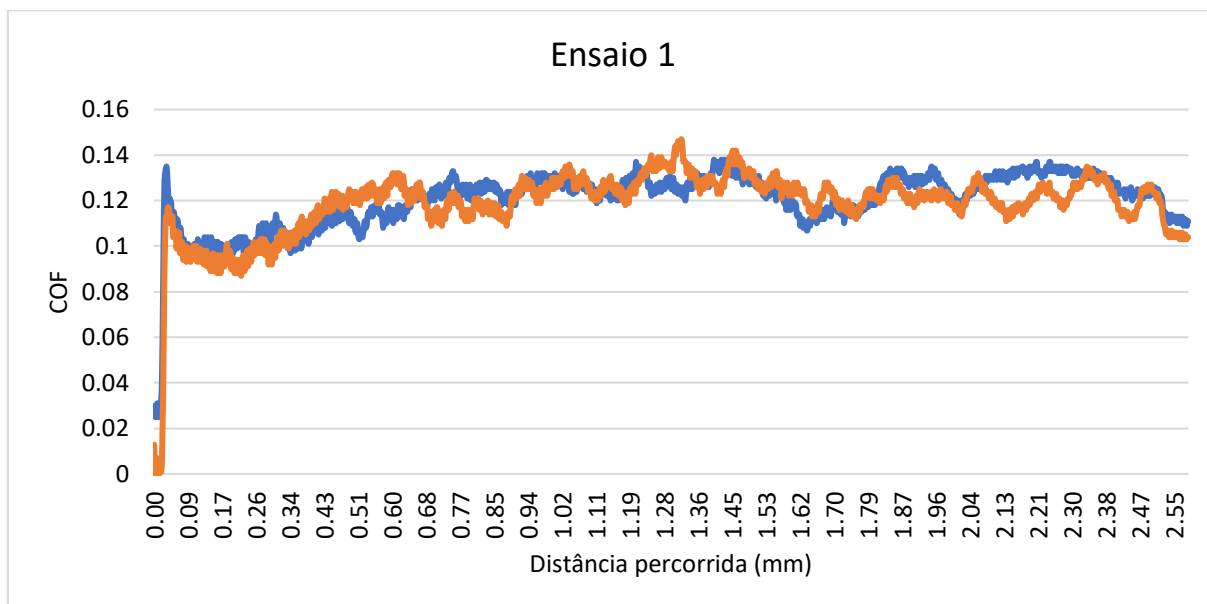
XAVIER, M. D. **Mecanismos de Endurecimento da Superliga Inconel 718.** Revista de Educação e Tecnologia do SENAI-SP, ISSN. v.3 n.7, 2009.

XU, Z. H. **Mechanical Characterization of Coatings and Composites** Department of Materials Science Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2004.

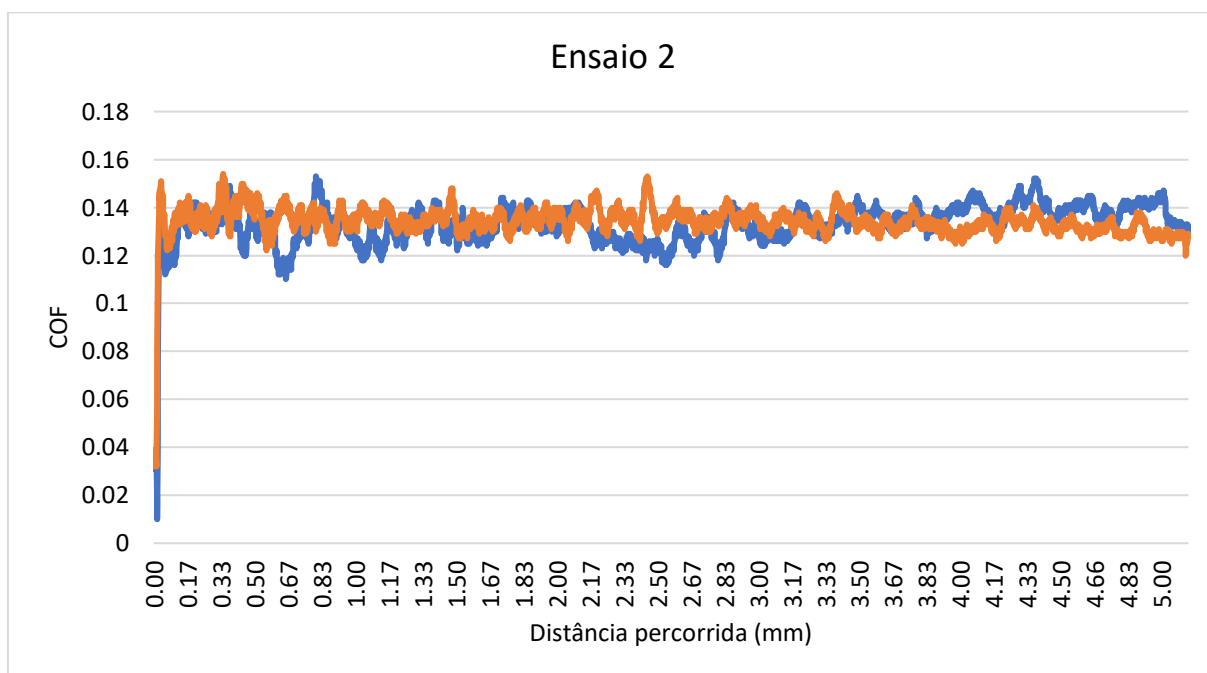
ZUM GAHR, K., H. **Modelling of Two-Body Abrasive Wear.** Institute of Materials Technology, University of Siegen, 1987.

ANEXO A – GRÁFICOS DO COEFICIENTE DE ATRITO VERSUS DISTÂNCIA PERCORRIDA

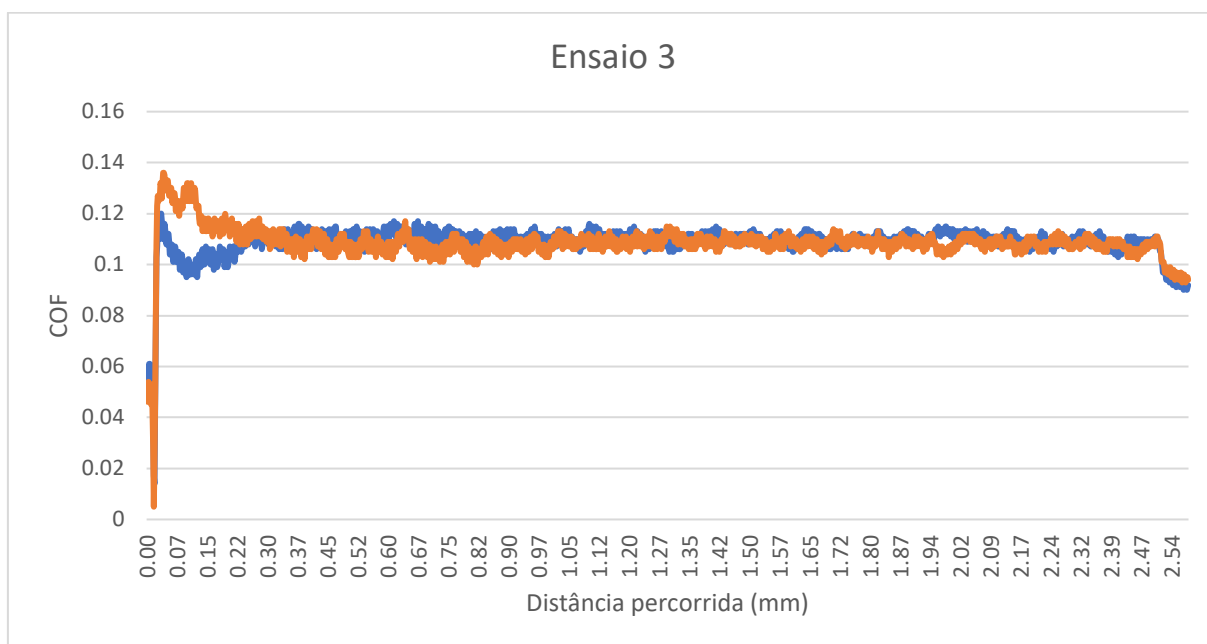
Ensaio A - Experimento nº 1 – Aço 316L – Distância percorrida: 2,58mm



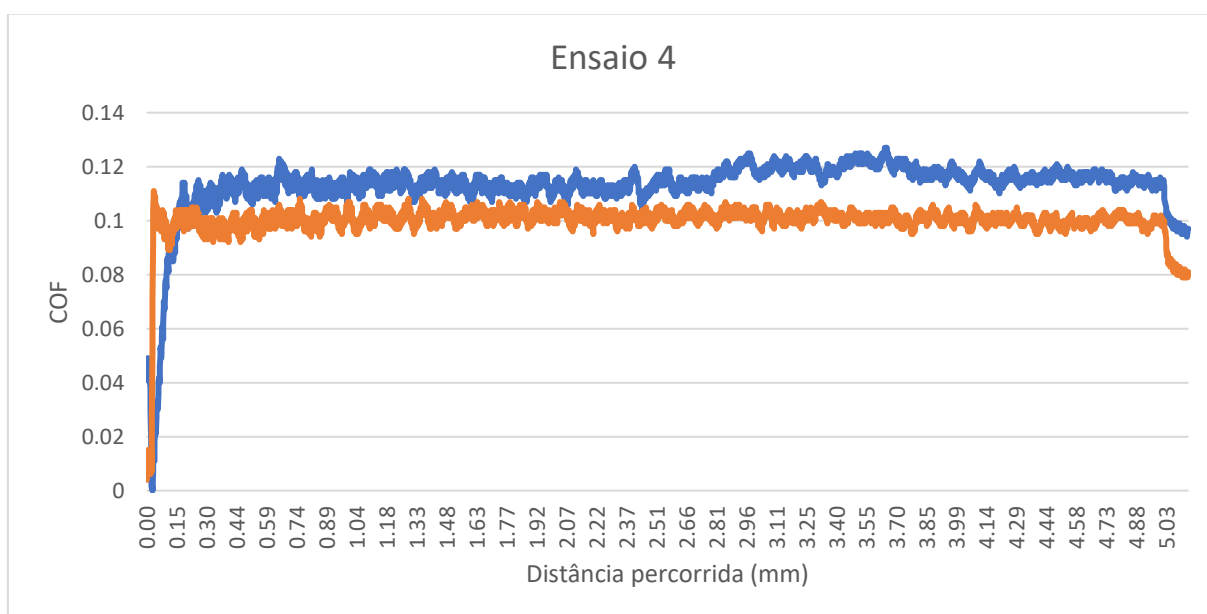
Ensaio A - Experimento nº 2 – Aço 316L – Distância percorrida: 5,13mm



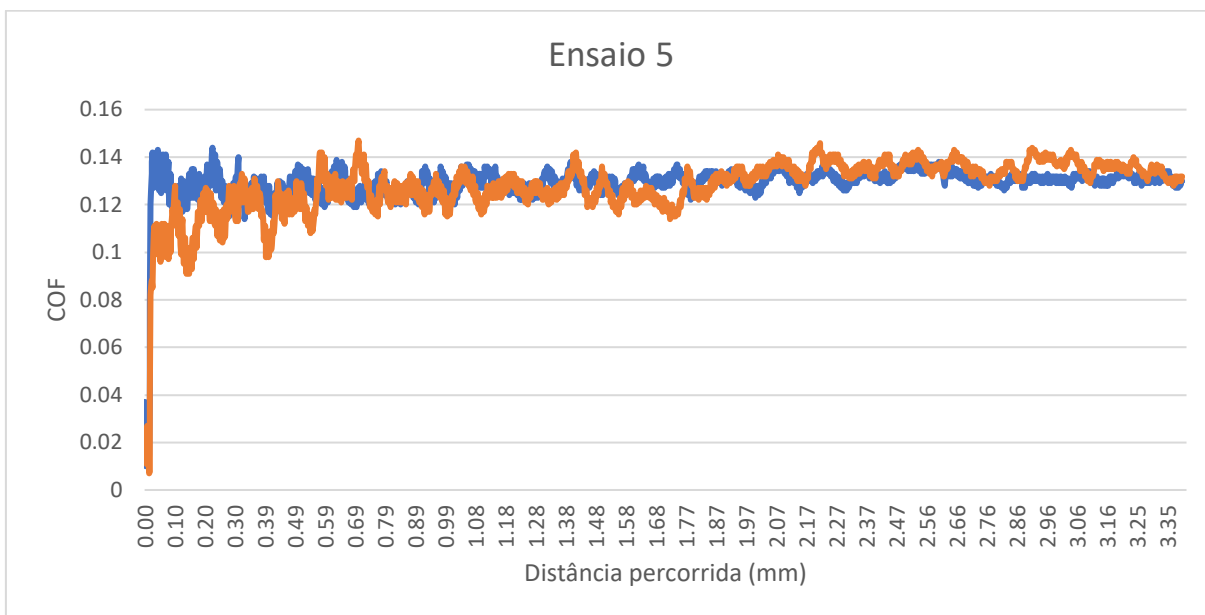
Ensaio A - Experimento n° 3 – INCONEL 718 – Distância percorrida: 2,58mm



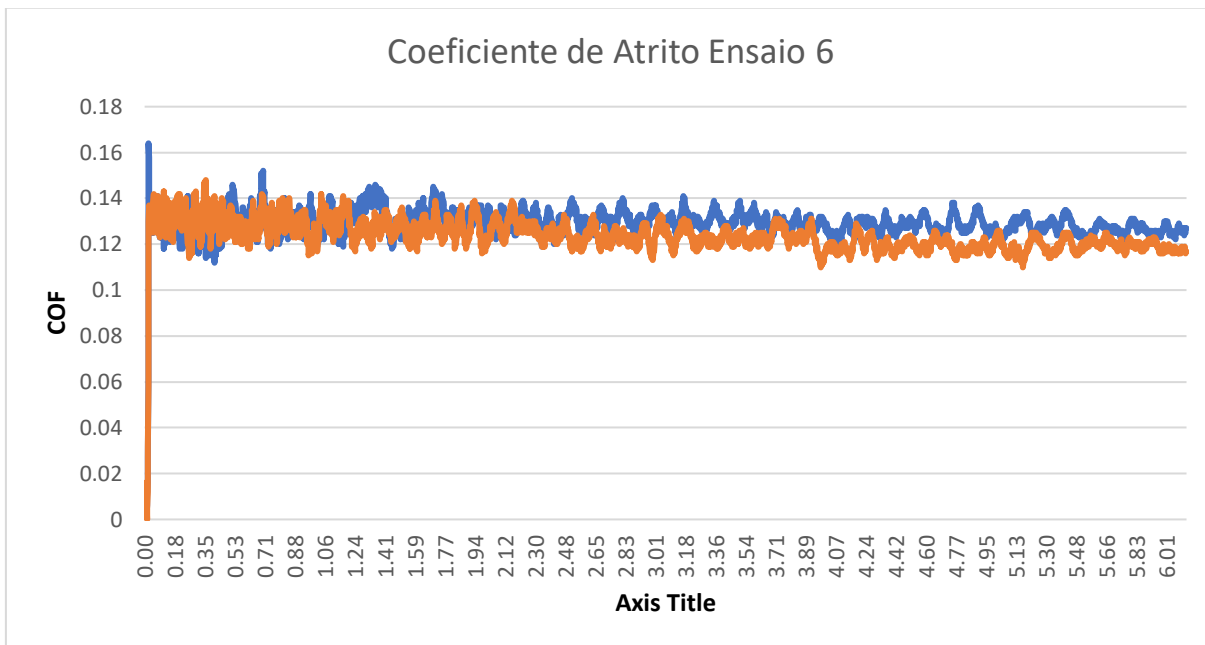
Ensaio A - Experimento n° 4 – INCONEL 718 – Distância percorrida: 5,13mm



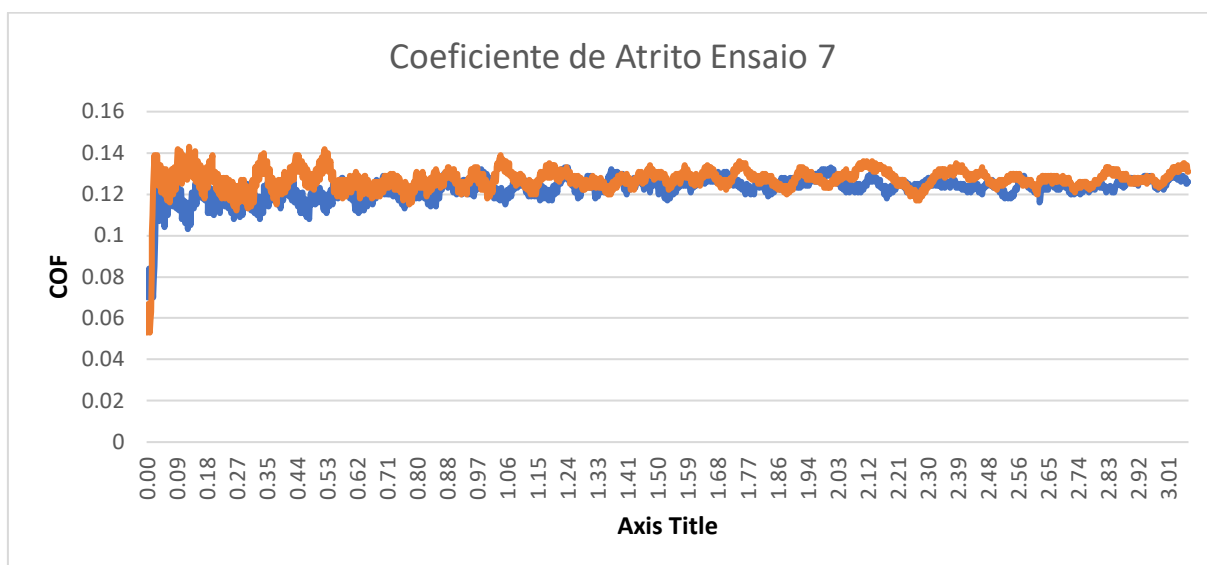
Ensaio B - Experimento n° 5 – Aço 316L – Distância percorrida: 3,4mm



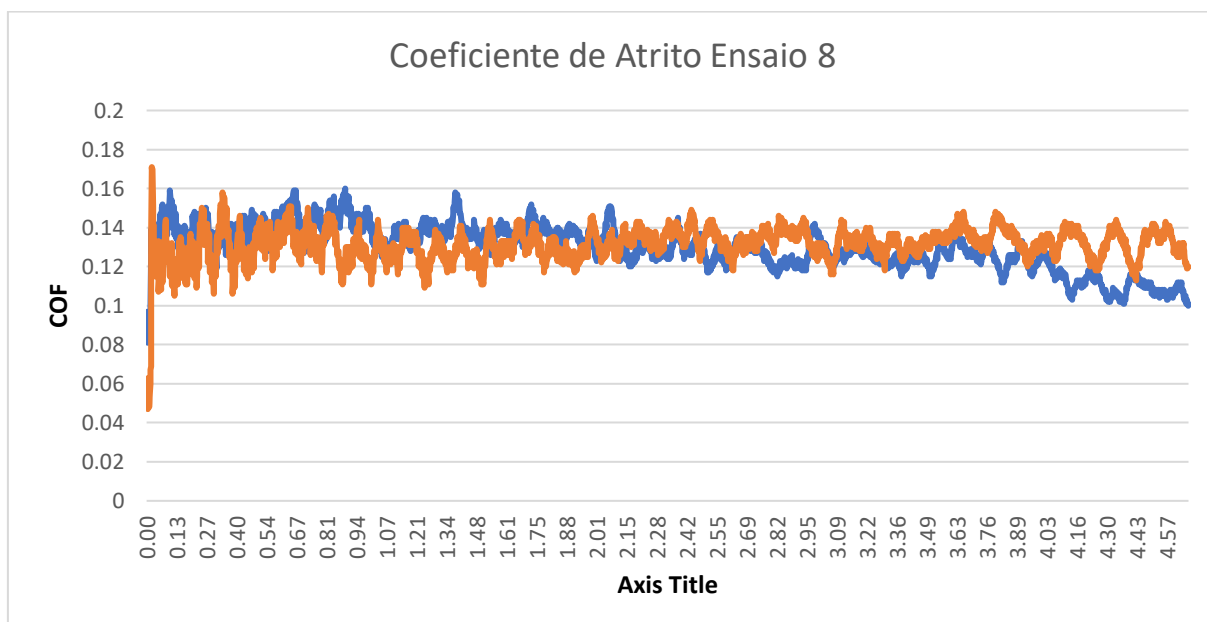
Ensaio B - Experimento n°6 – Aço 316L – Distância percorrida: 6,13mm



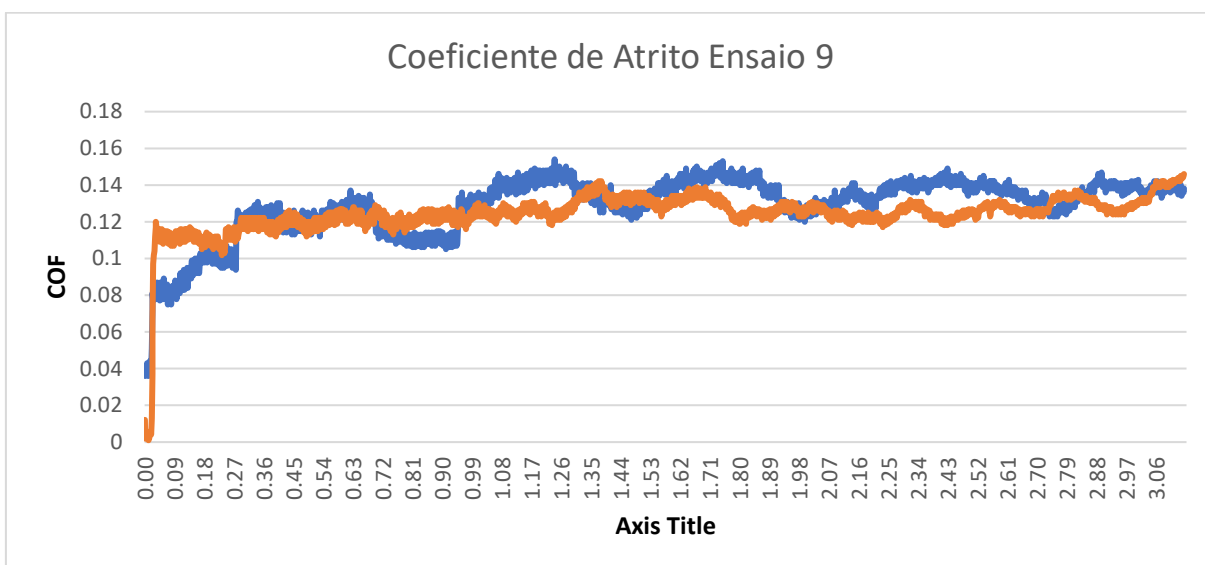
Ensaio B - Experimento n° 7 – INCONEL 718 – Distância percorrida: 3,06mm



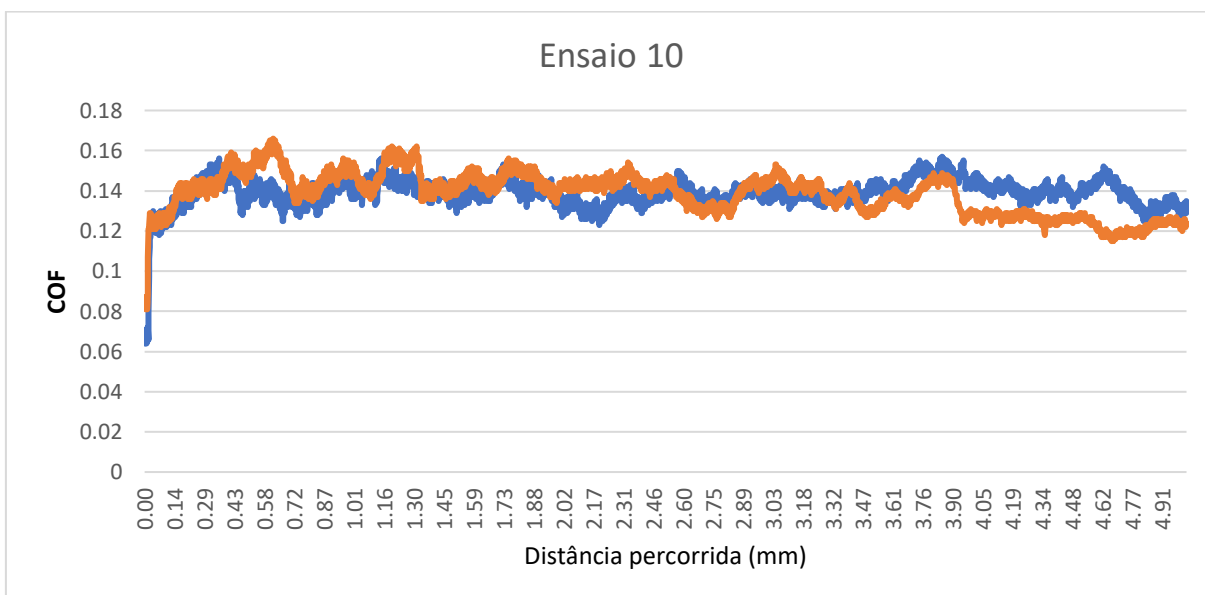
Ensaio B - Experimento n° 8 – INCONEL 718 – Distância percorrida: 4,06mm



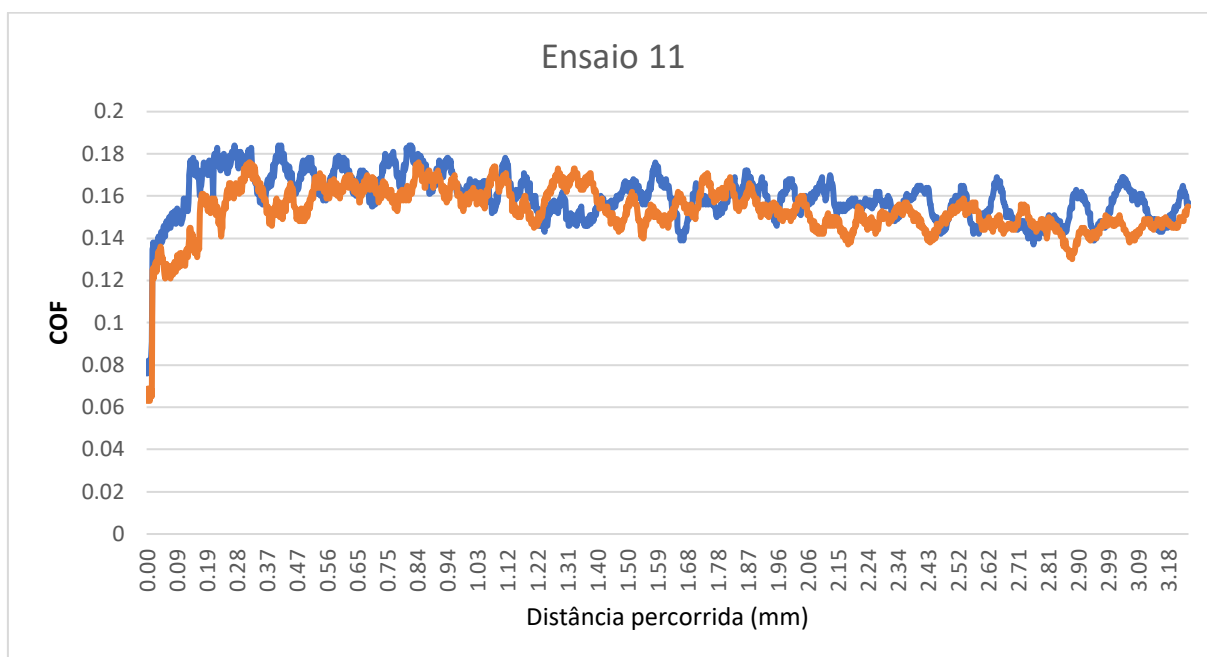
Ensaio C - Experimento n° 9 – Aço 316L – Distância percorrida: 3,14mm



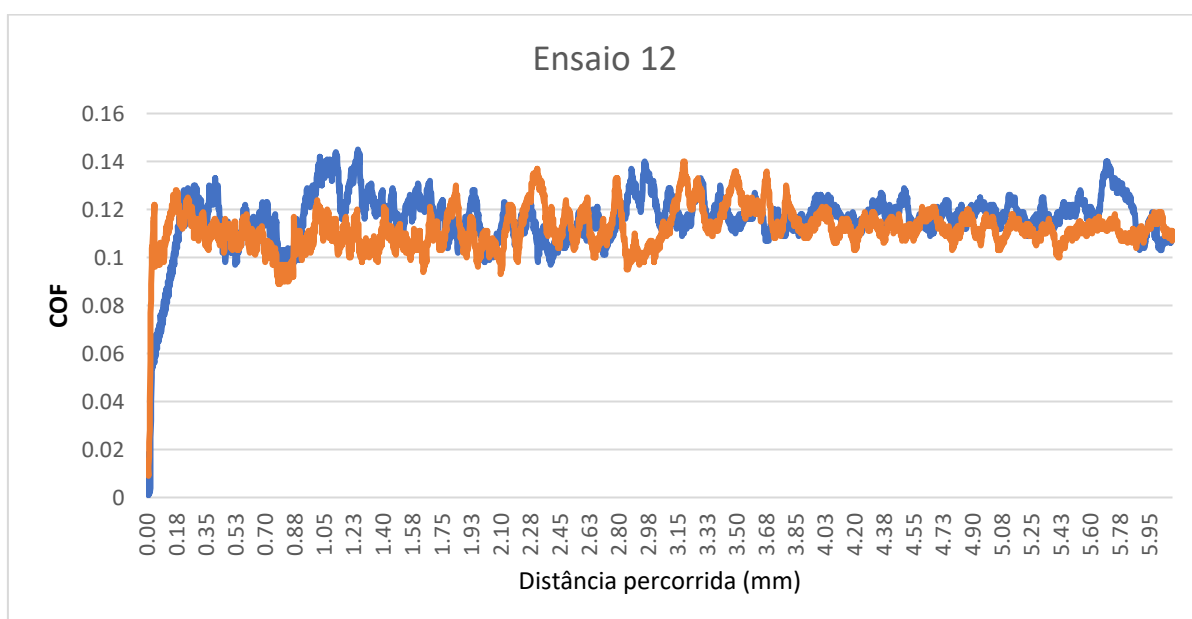
Ensaio C - Experimento n° 10 – Aço 316L – Distância percorrida: 5,03mm



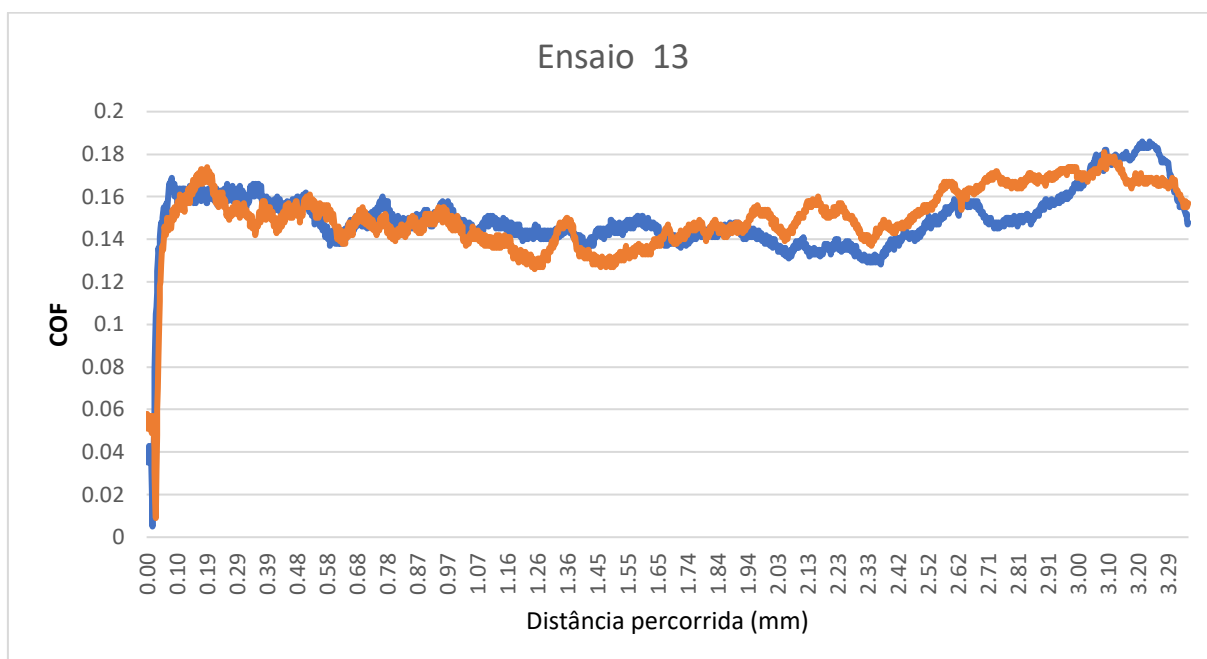
Ensaio C - Experimento n° 11 – INCONEL 718 – Distância percorrida: 3,24mm



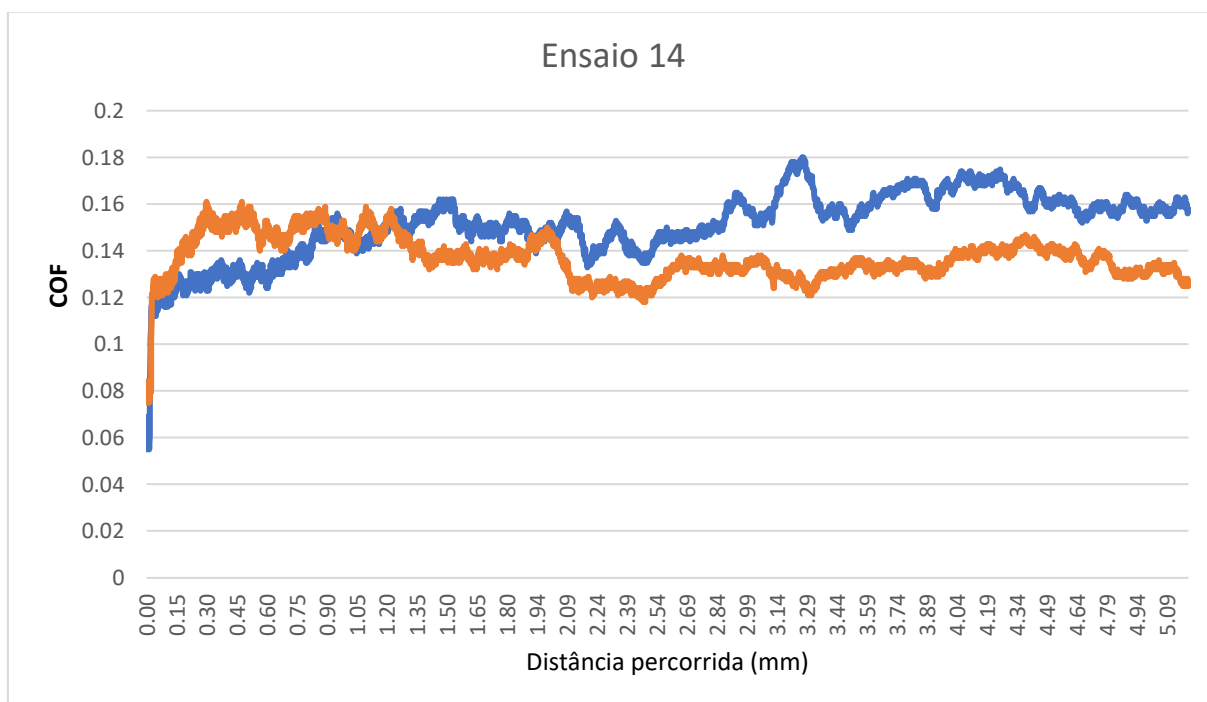
Ensaio C - Experimento n° 12 – INCONEL 718 – Distância percorrida: 6,09mm



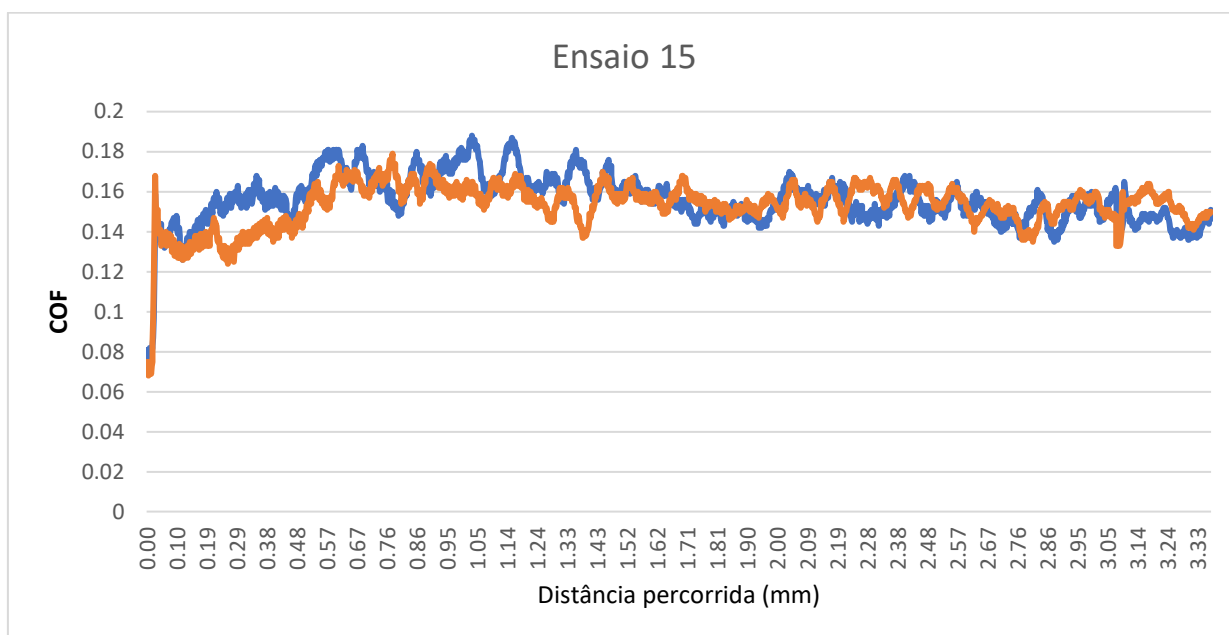
Ensaio D - Experimento n° 13 – Aço 316L – Distância percorrida: 3,36mm



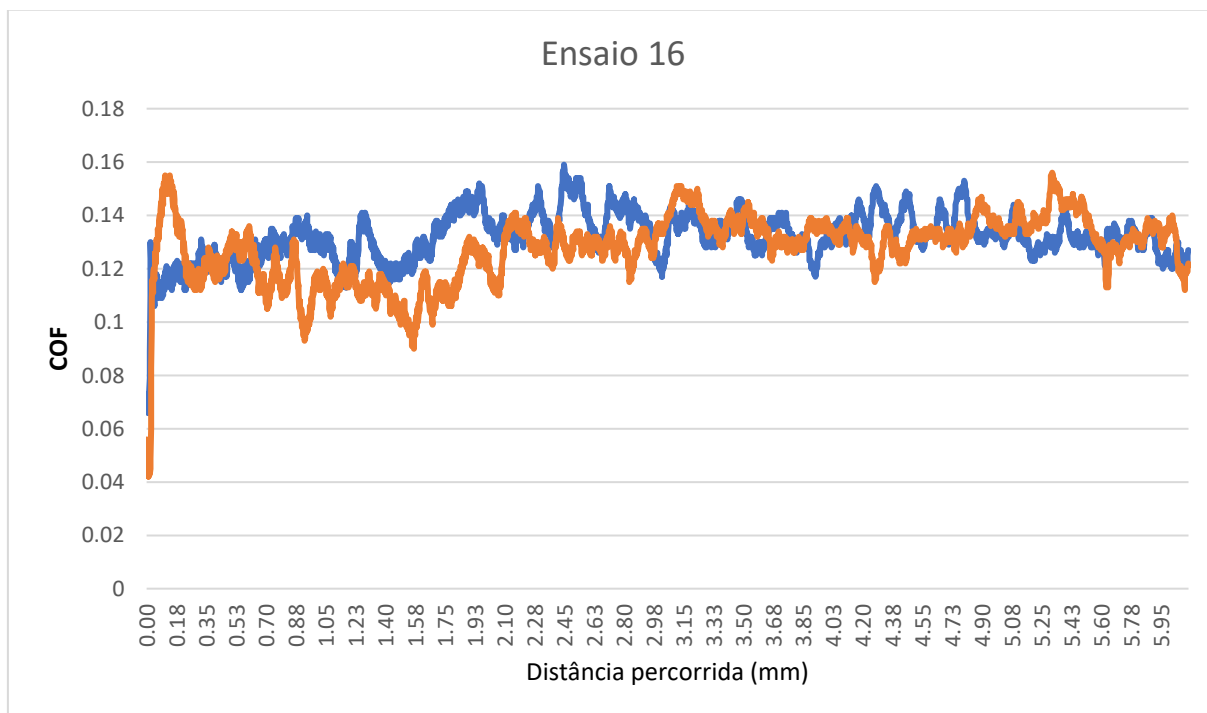
Ensaio D - Experimento n° 14 – Aço 316L – Distância percorrida: 6,4mm



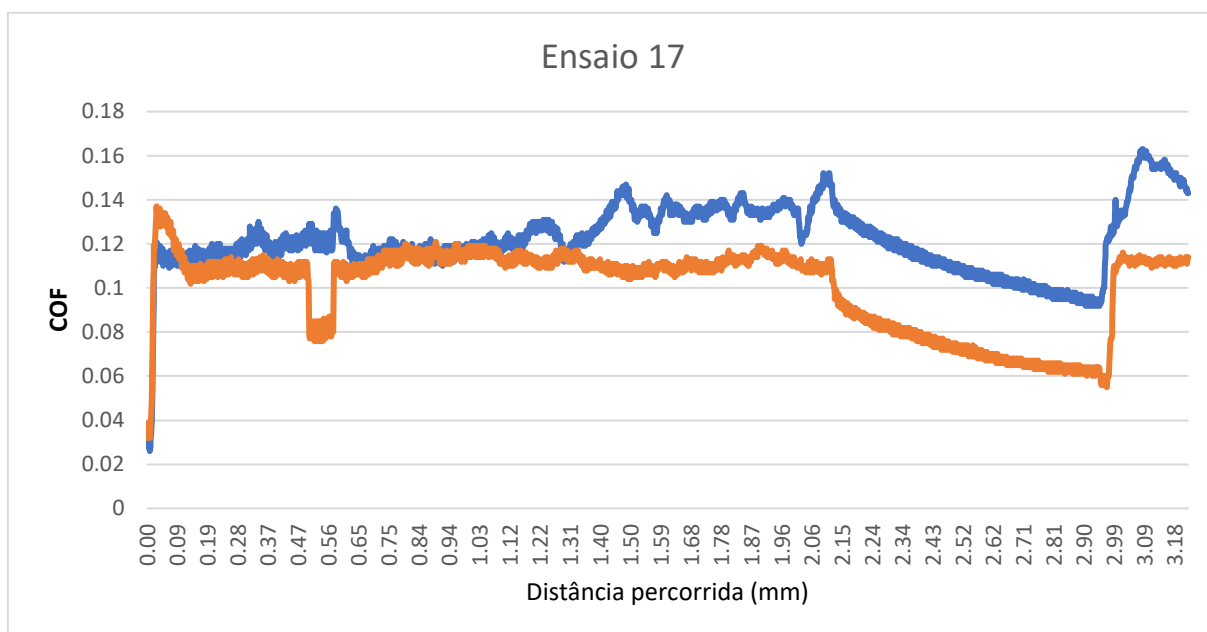
Ensaio D - Experimento n° 15 – INCONEL 718 – Distância percorrida: 3,37mm



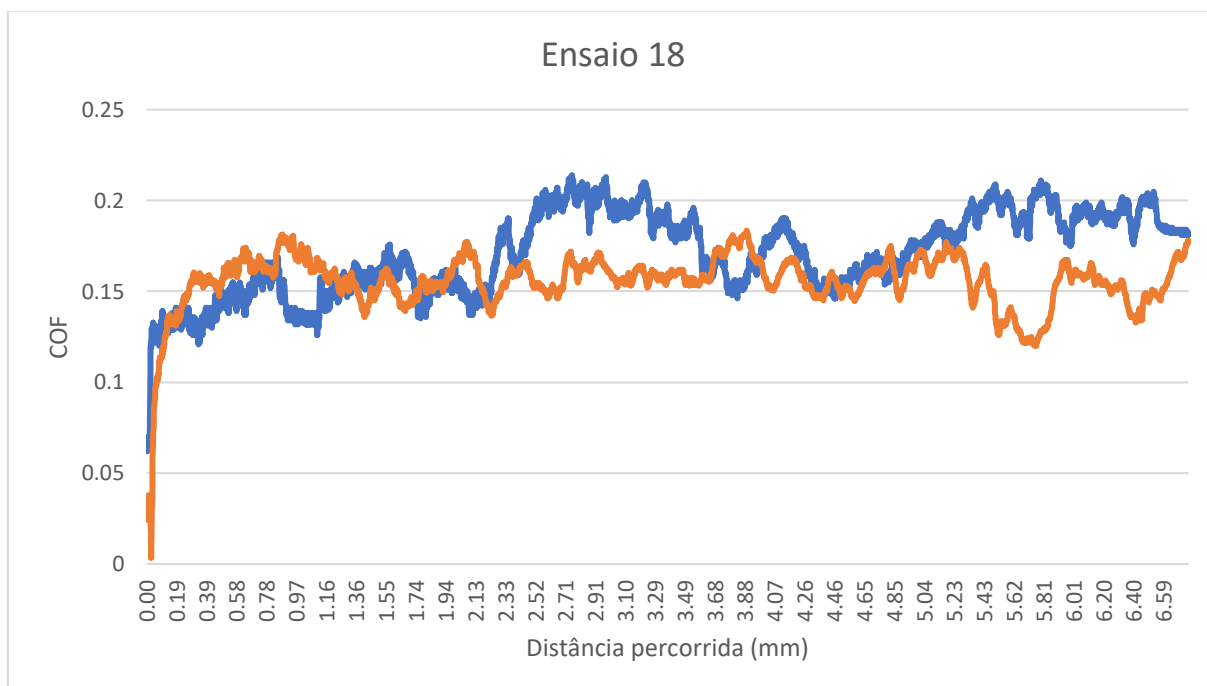
Ensaio E - Experimento n° 16 – INCONEL 718 – Distância percorrida: 6,11mm



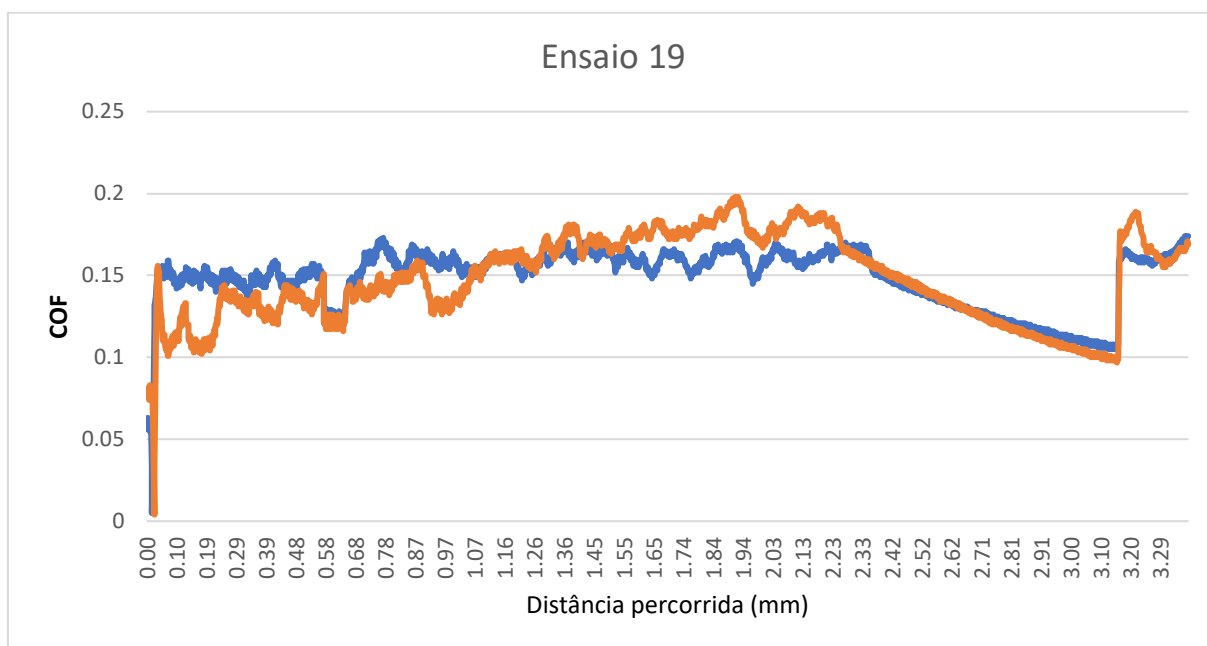
Ensaio E - Experimento n° 17 – Aço 316L – Distância percorrida: 3,22mm



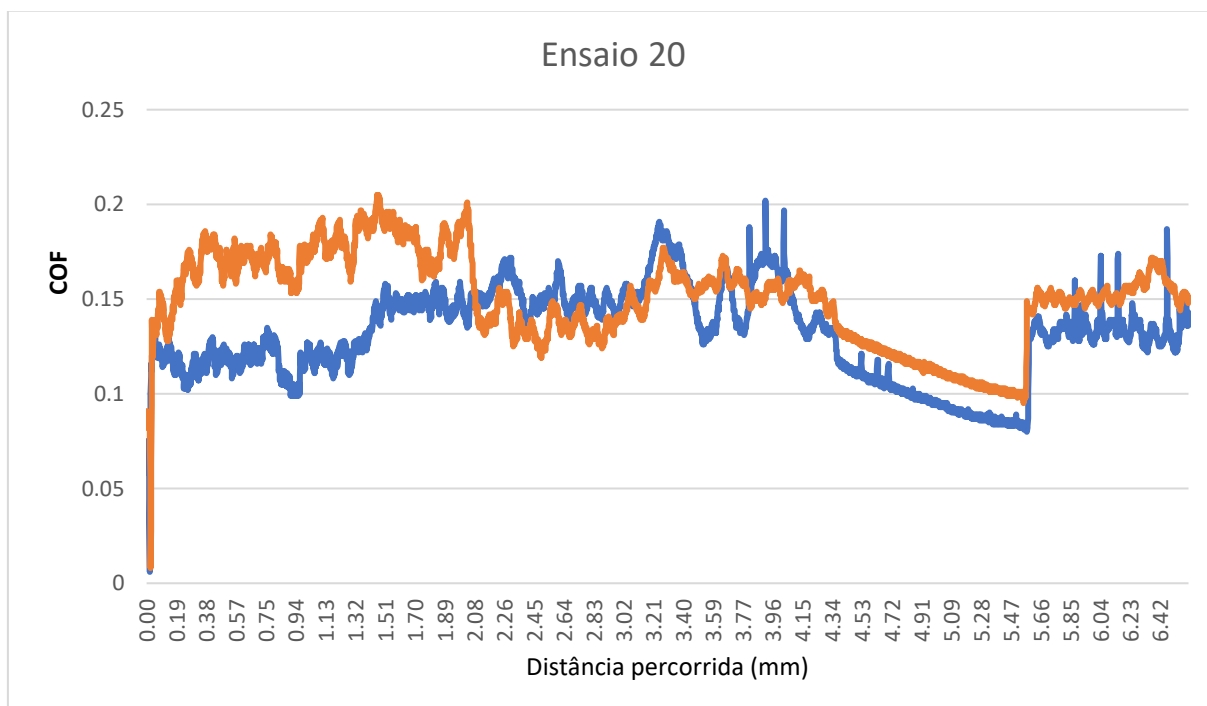
Ensaio E - Experimento n° 18 – Aço 316L – Distância percorrida: 6,75mm



Ensaio E - Experimento n° 19 – INCONEL 718 – Distância percorrida: 3,38mm

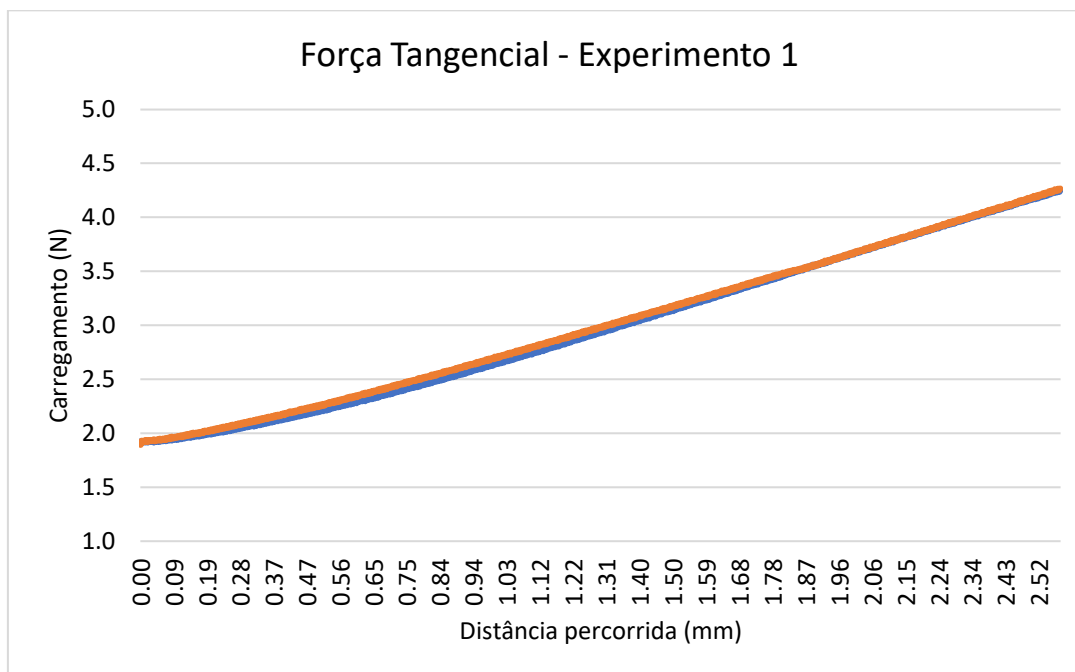


Ensaio E - Experimento n° 20 – INCONEL 718 – Distância percorrida: 6,59mm

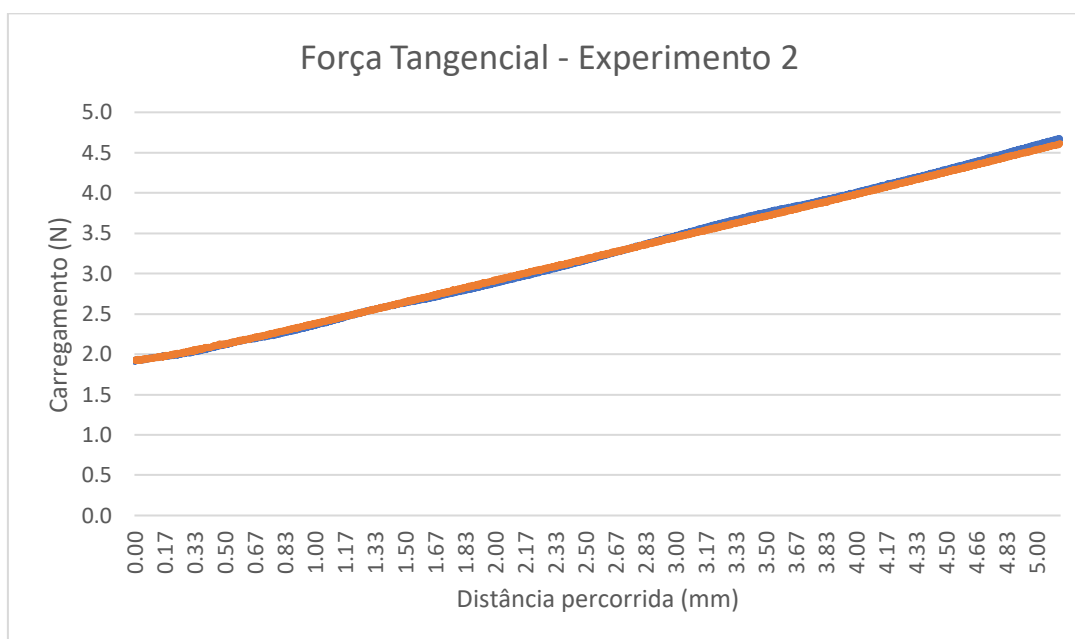


ANEXO B – GRÁFICOS DO CARREGAMENTO VERSUS DISTÂNCIA PERCORRIDA

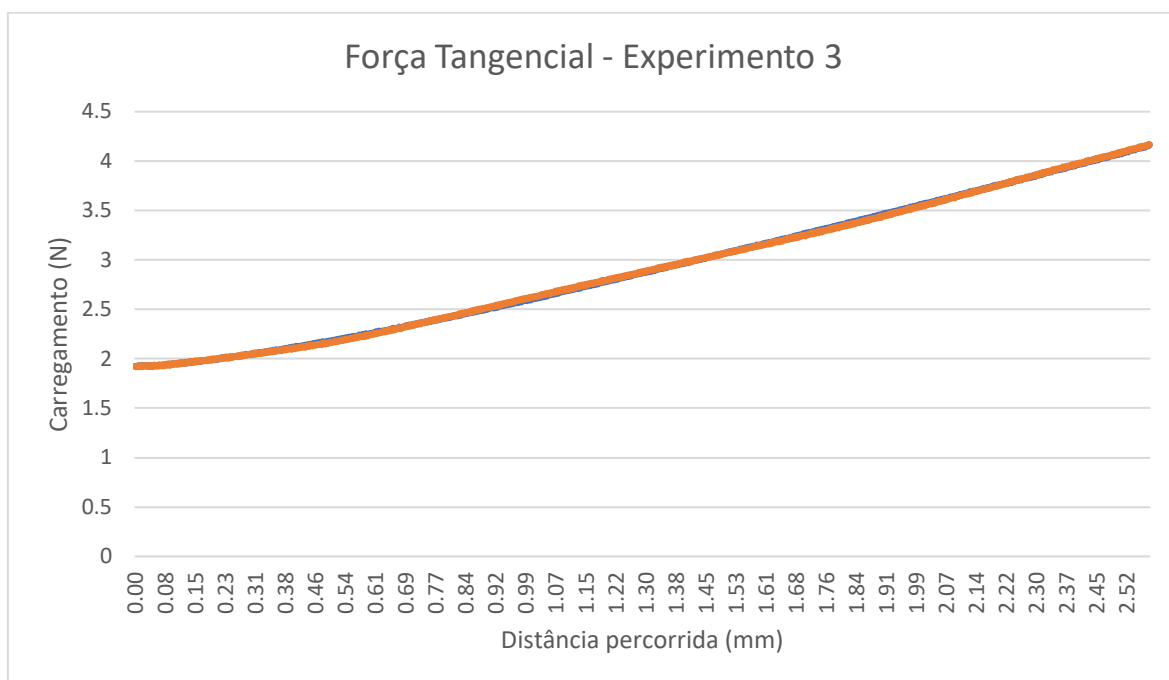
Ensaio A - Experimento nº 1 – Aço 316L



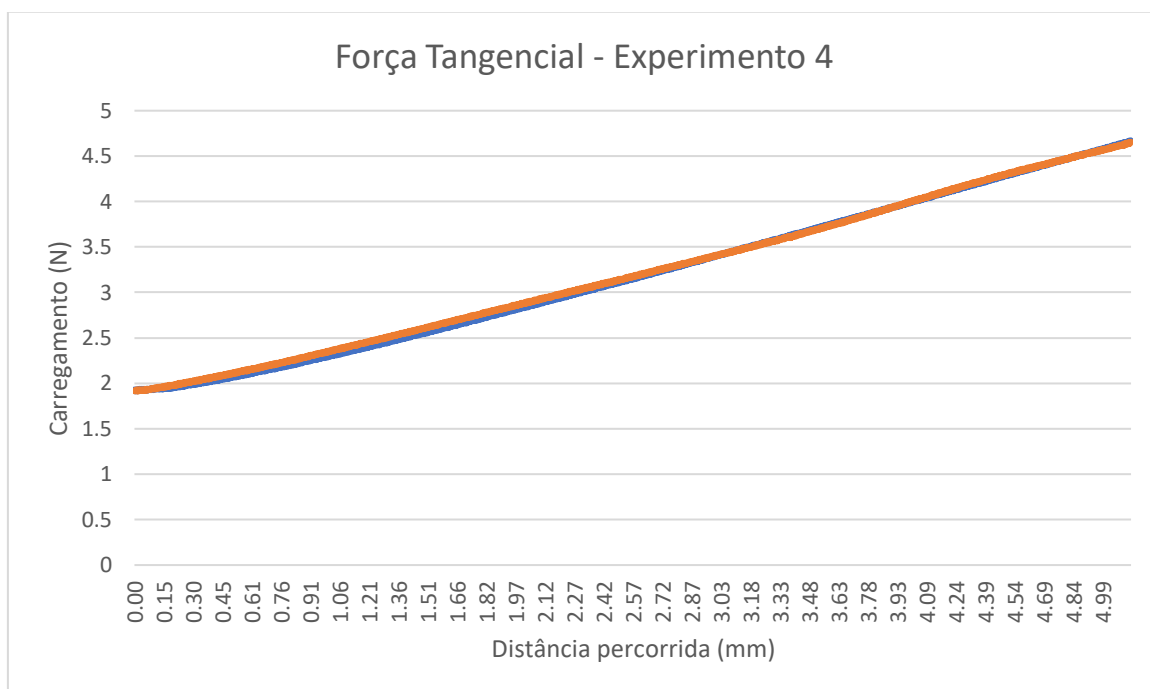
Ensaio A - Experimento nº 2 – Aço 316L



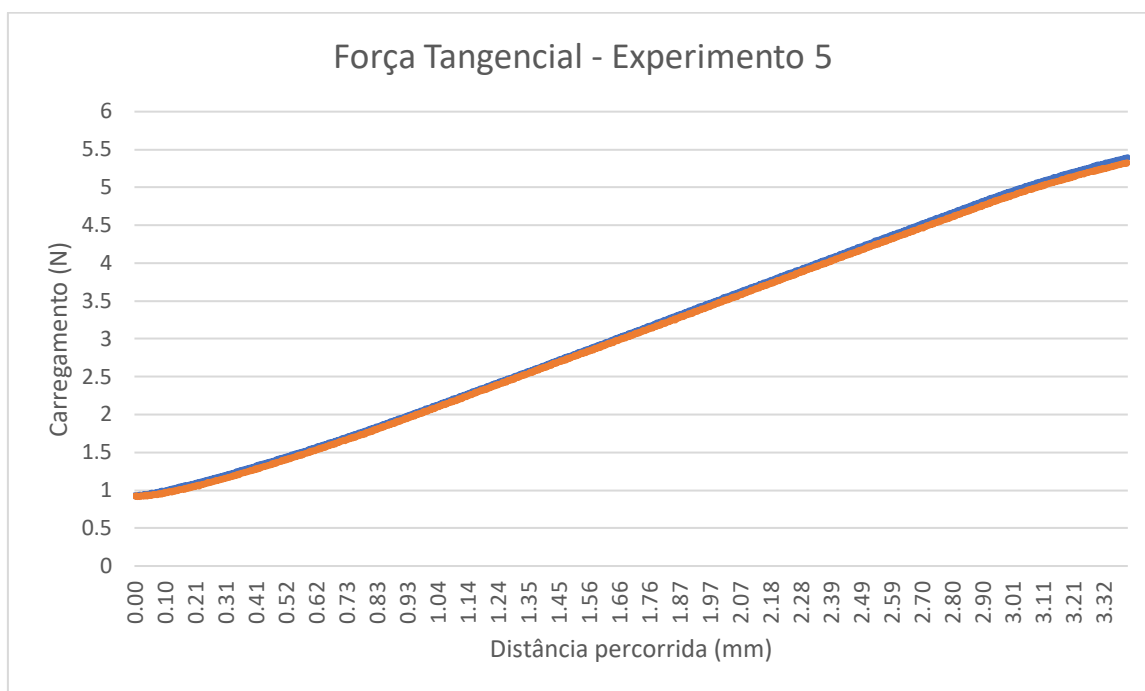
Ensaio A - Experimento n° 3 – INCONEL 718



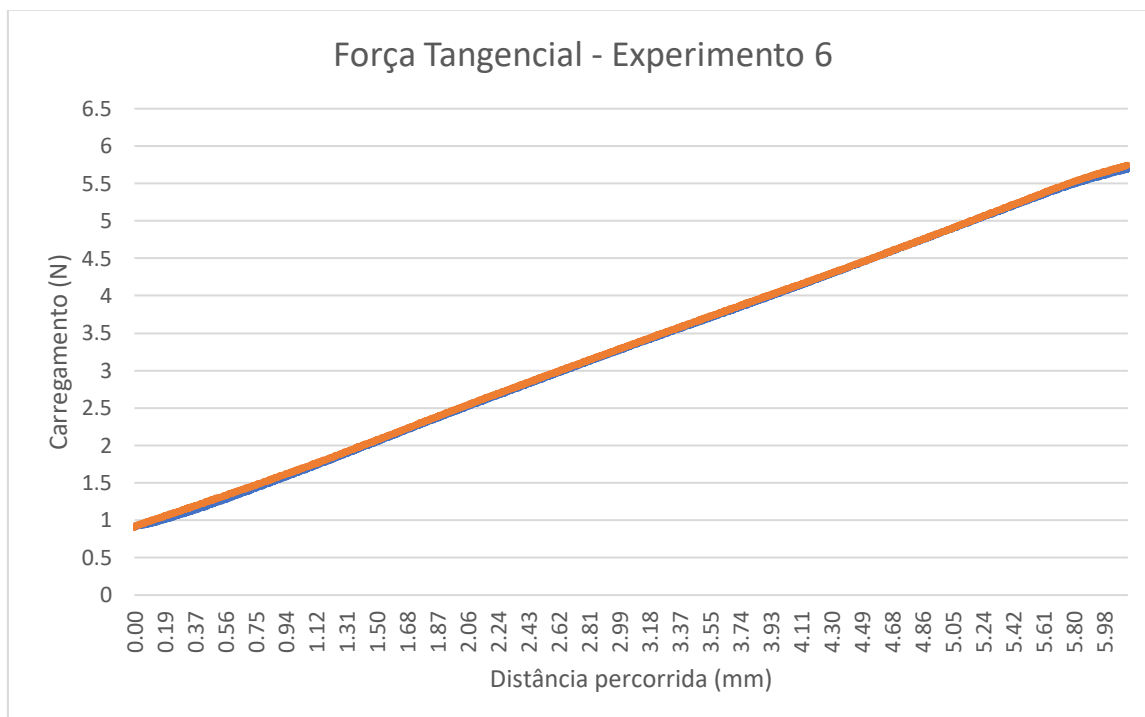
Ensaio A - Experimento n° 4 – INCONEL 718



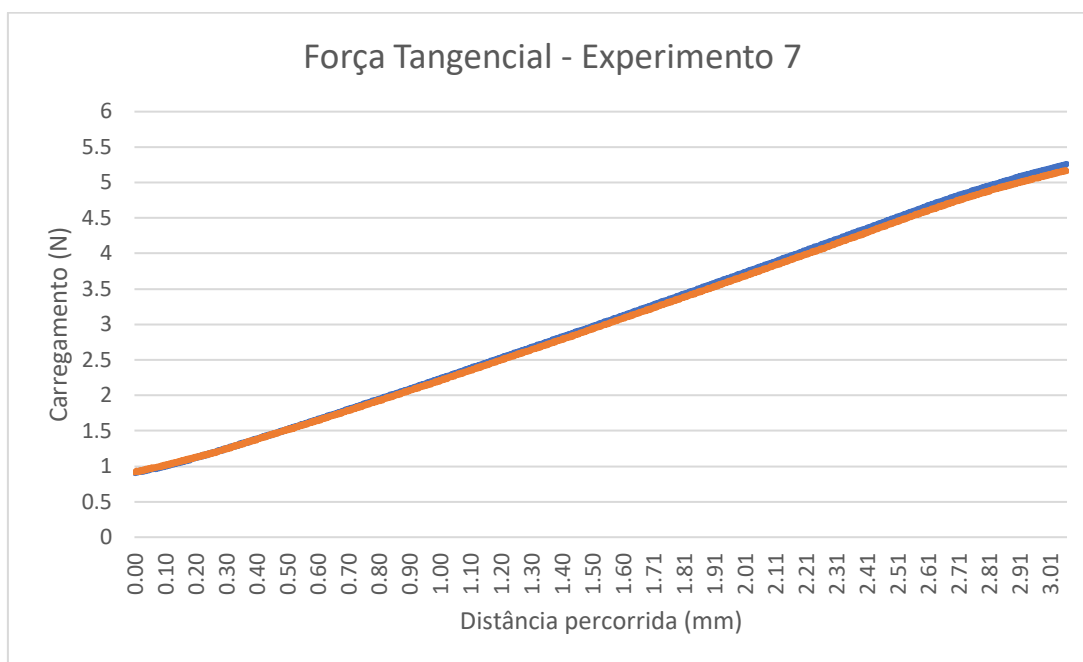
Ensaio B - Experimento n° 5 – Aço 316L



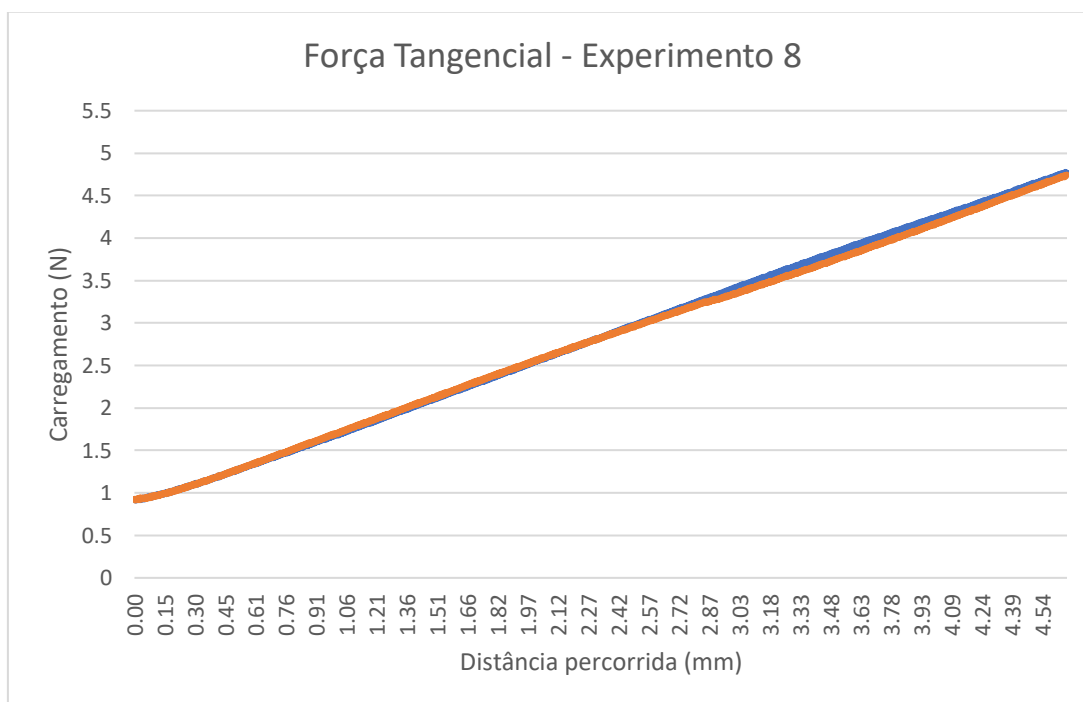
Ensaio B - Experimento n°6 – Aço 316L



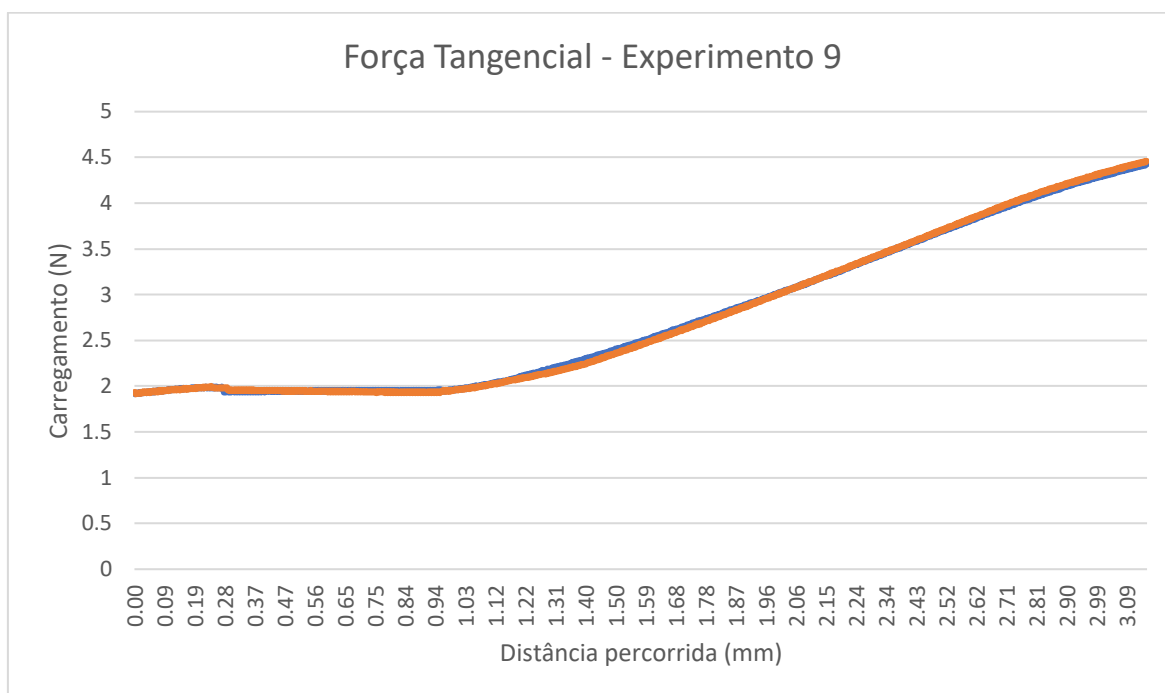
Ensaio B - Experimento n° 7 – INCONEL 718



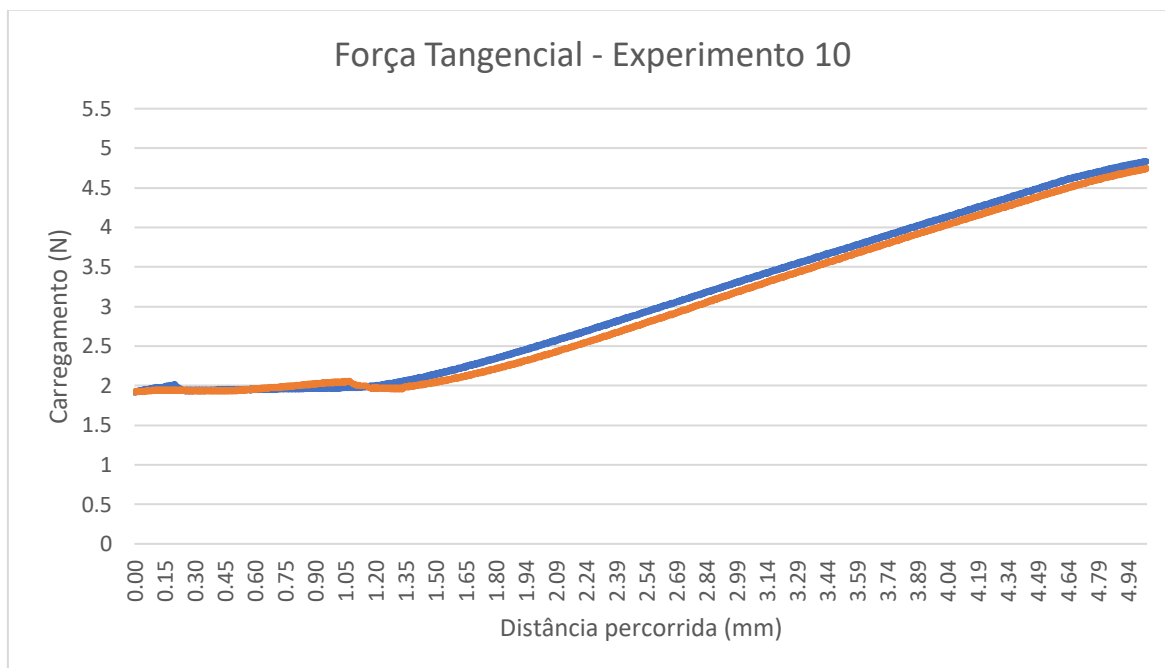
Ensaio B - Experimento n° 8 – INCONEL 718



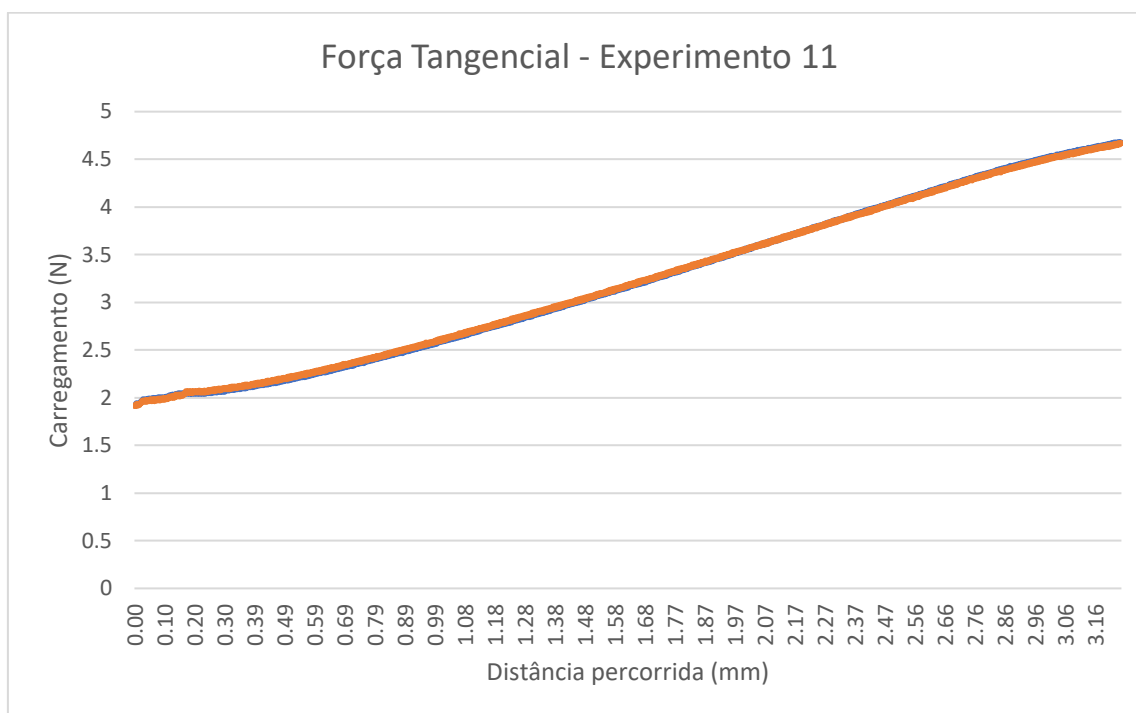
Ensaio C - Experimento n° 9 – Aço 316L



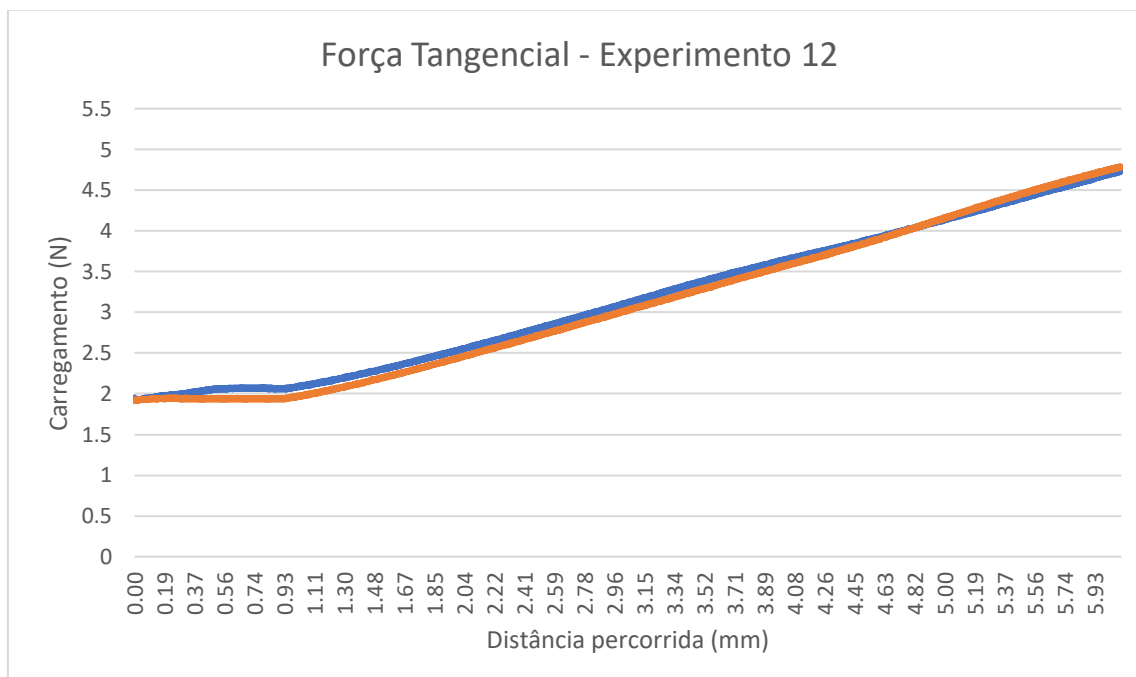
Ensaio C - Experimento n° 10 – Aço 316L



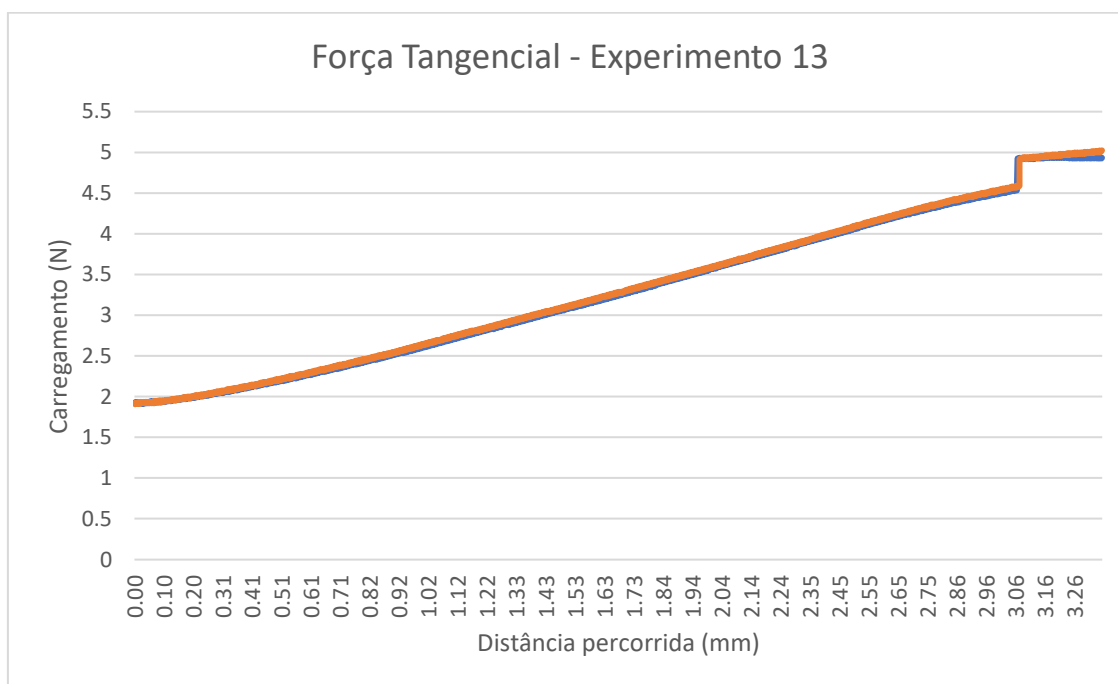
Ensaio C - Experimento n° 11 – INCONEL 718



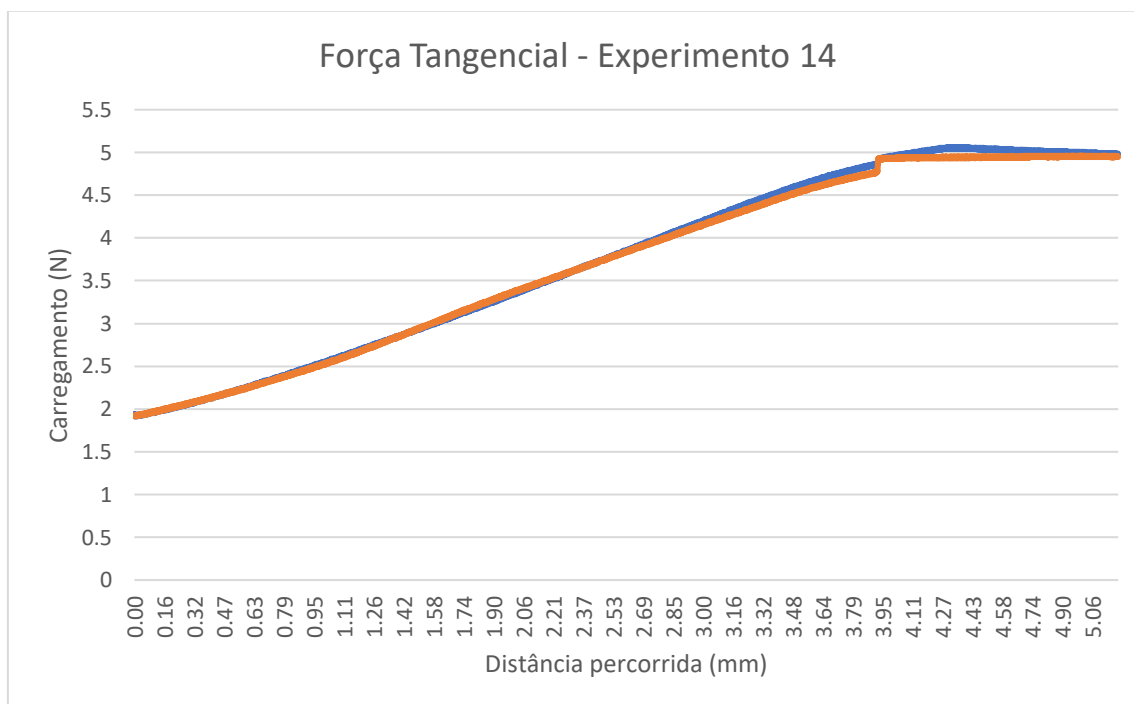
Ensaio C - Experimento n° 12 – INCONEL 718



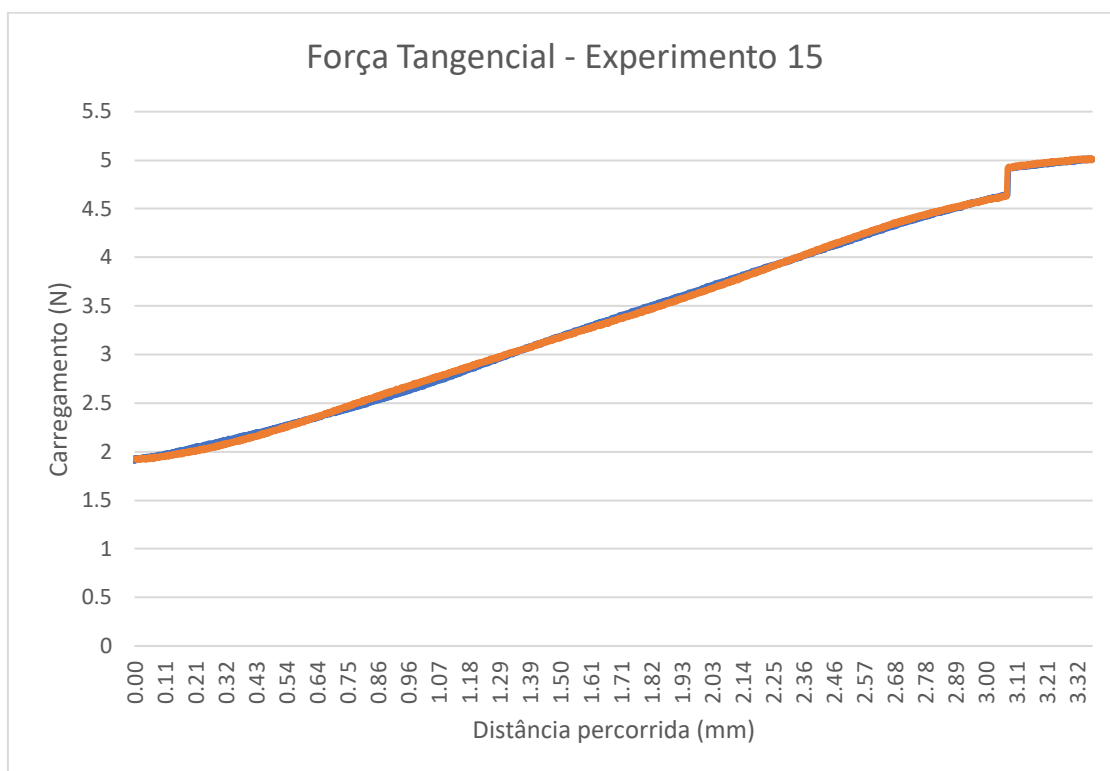
Ensaio D - Experimento n° 13 – Aço 316L



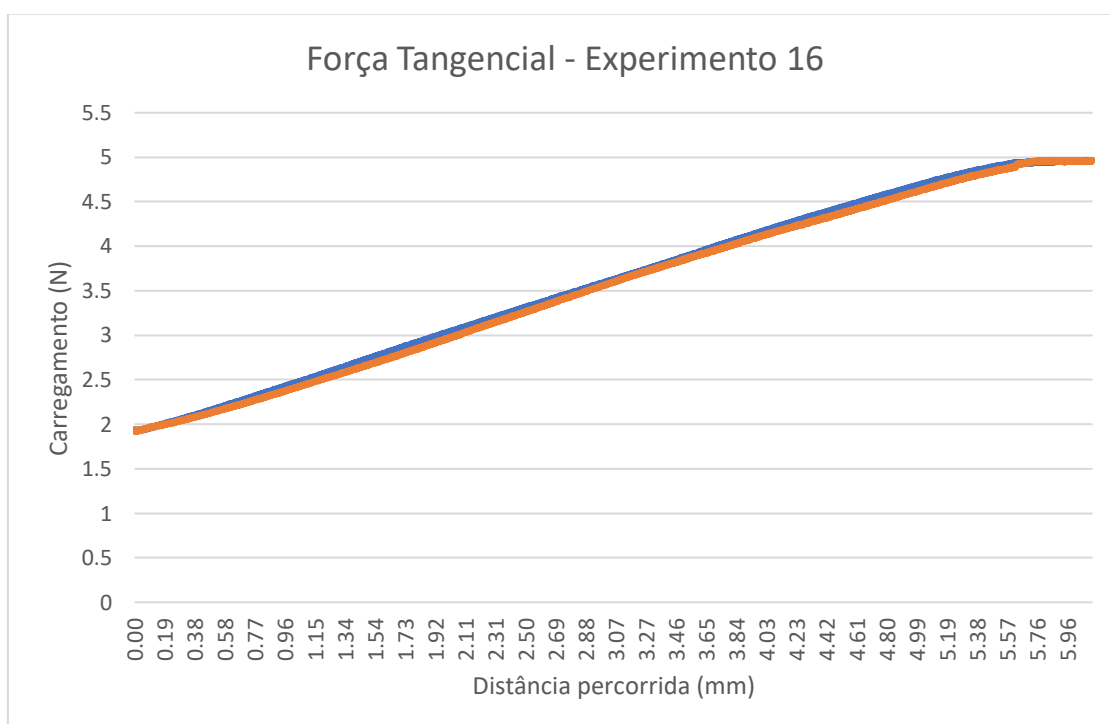
Ensaio D - Experimento n° 14 – Aço 316L



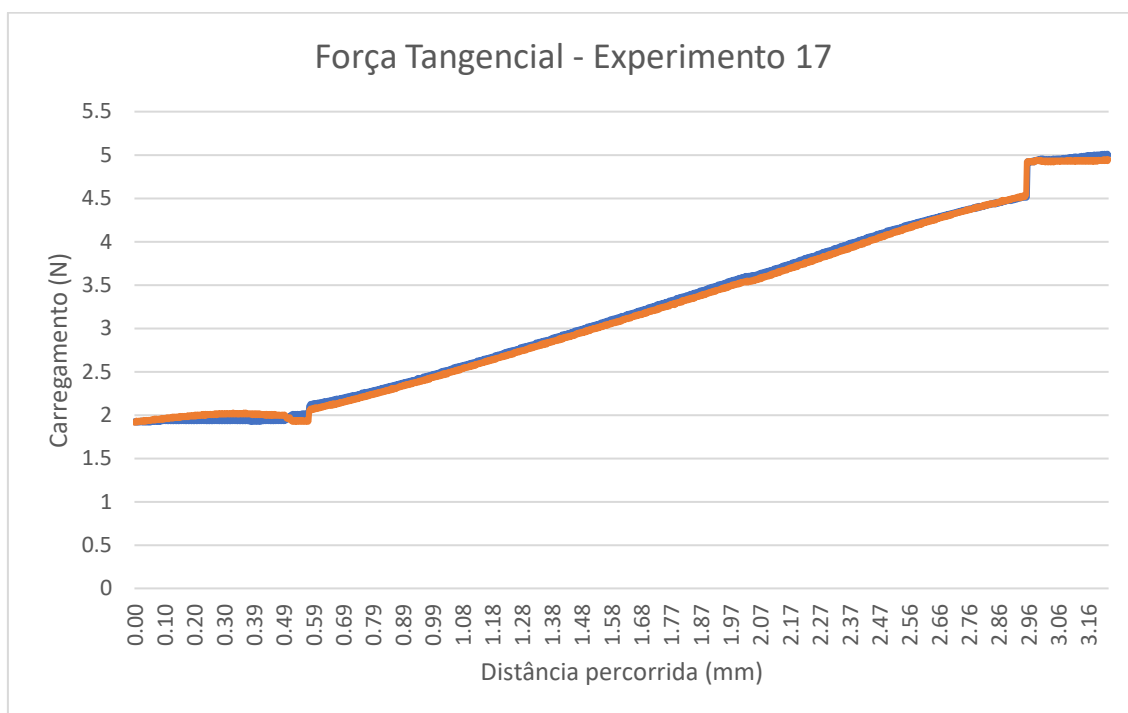
Ensaio D - Experimento n° 15 – INCONEL 718



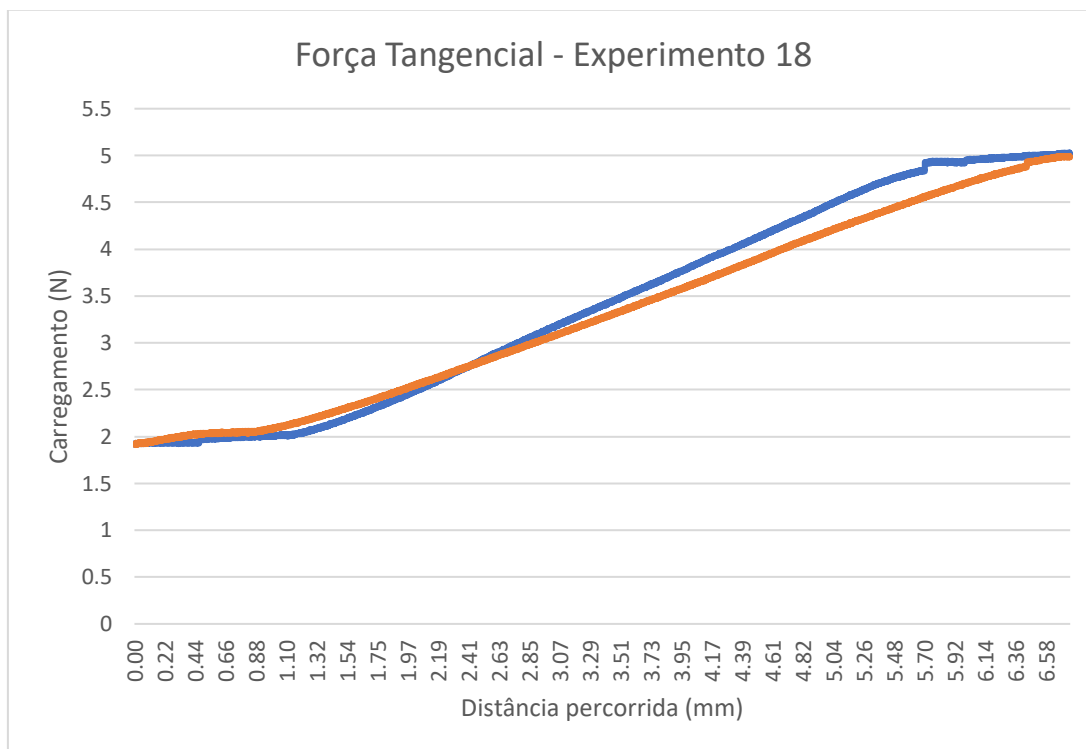
Ensaio E - Experimento n° 16 – INCONEL 718



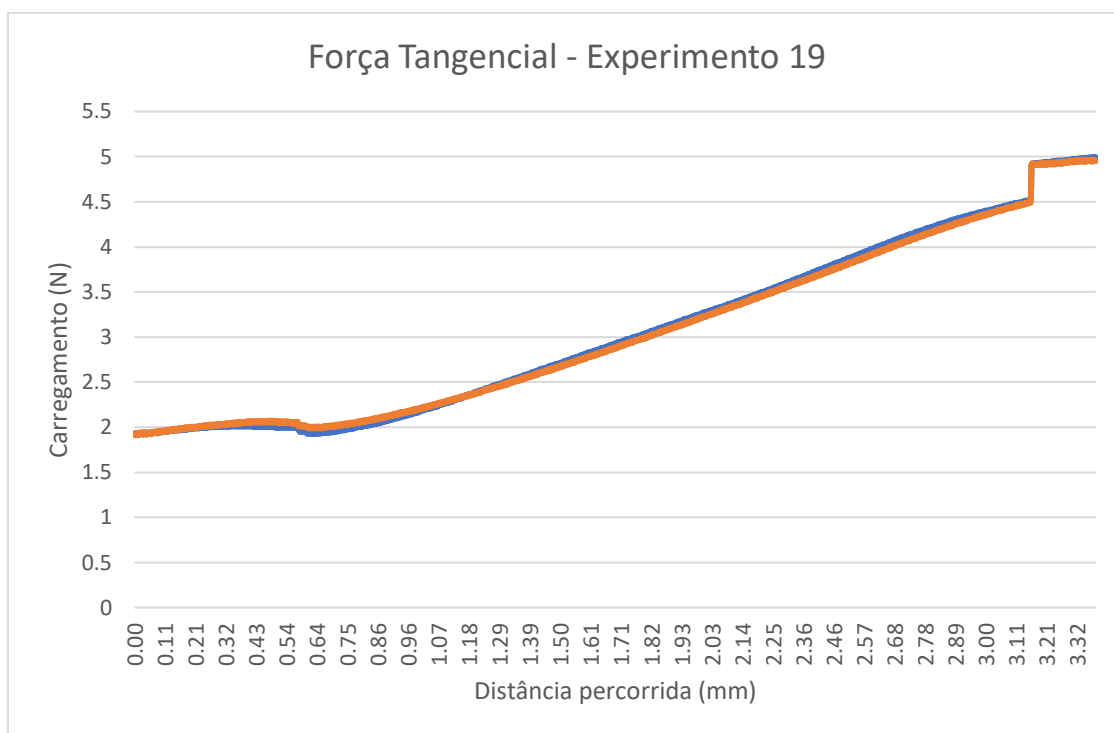
Ensaio E - Experimento nº 17 – Aço 316L



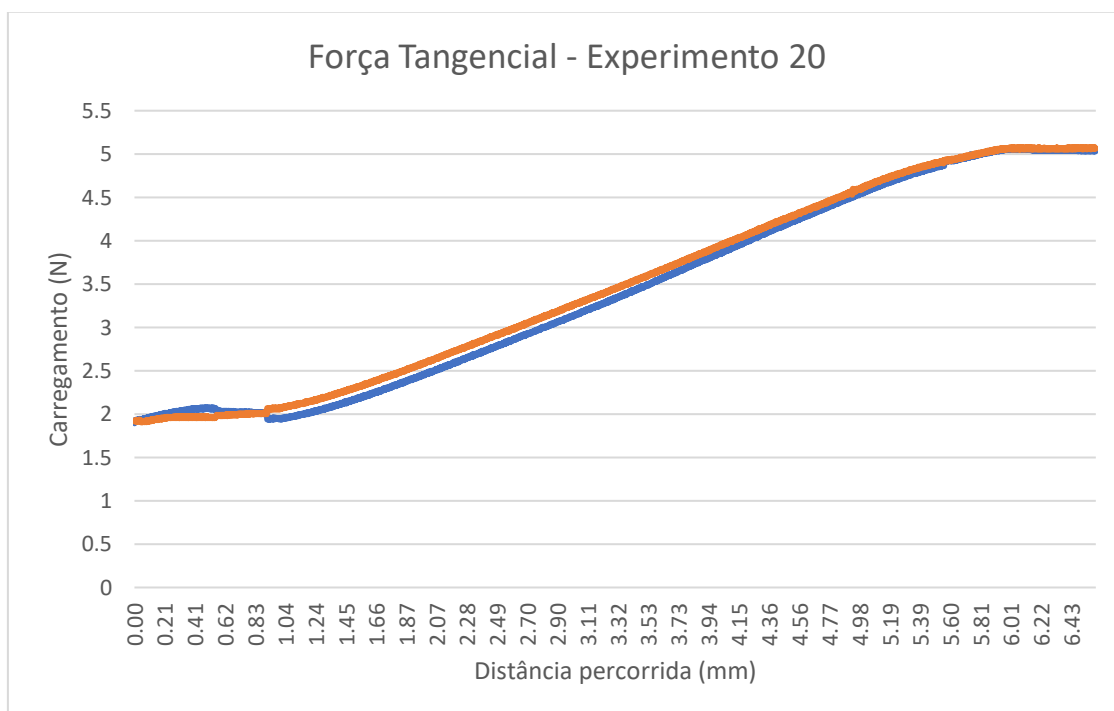
Ensaio E - Experimento nº 18 – Aço 316L



Ensaio E - Experimento nº 19 – INCONEL 718

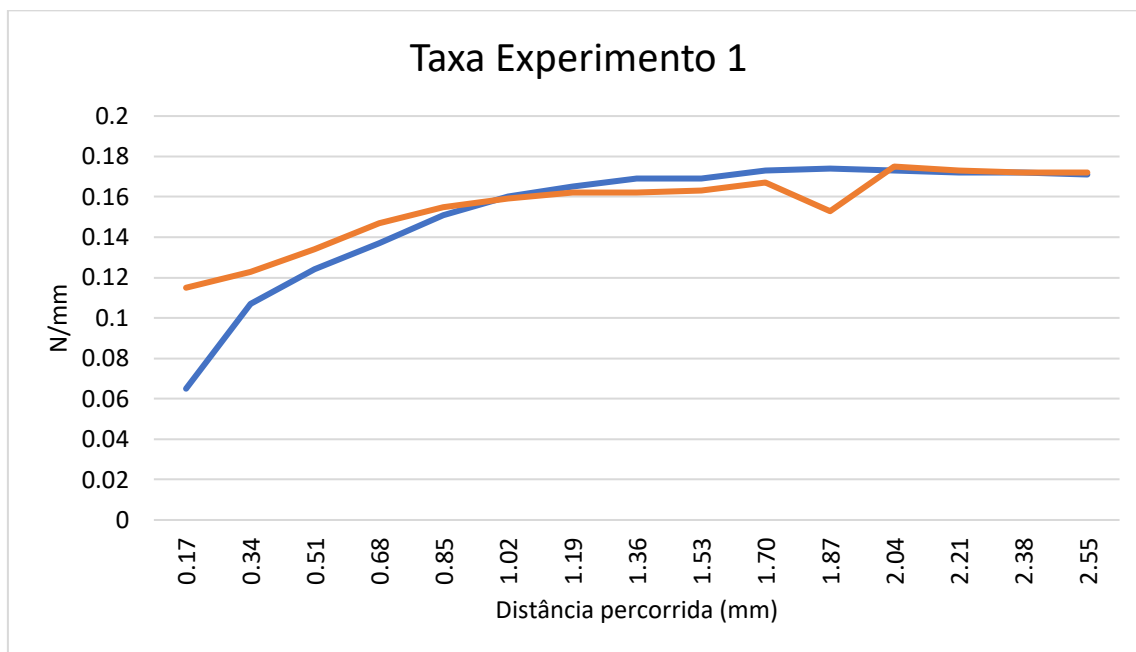


Ensaio E - Experimento nº 20 – INCONEL 718

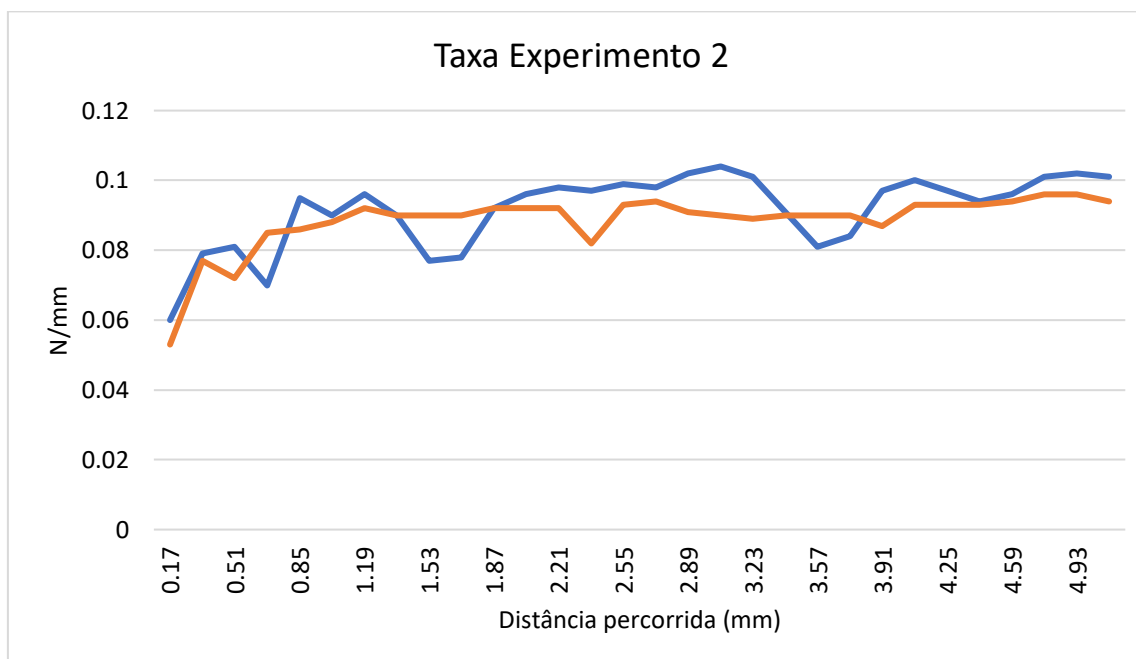


ANEXO C – GRÁFICOS DA TAXA DE DO CARREGAMENTO VERSUS DISTÂNCIA PERCORRIDA

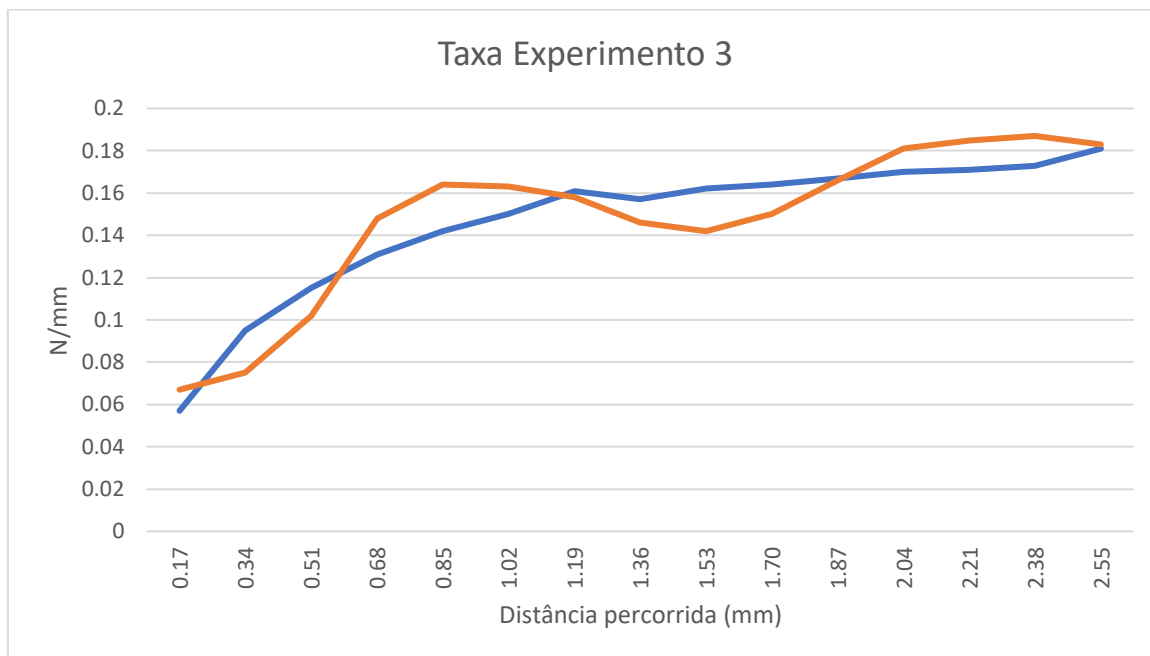
Ensaio A - Experimento n° 1 – Aço 316L



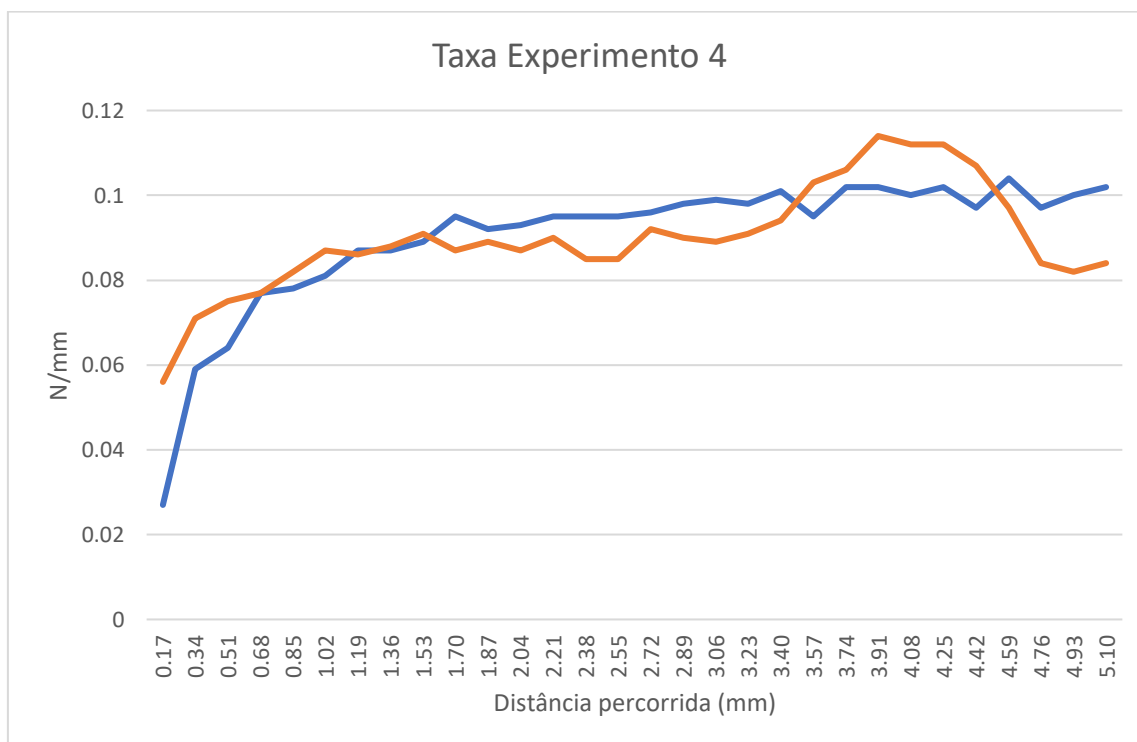
Ensaio A - Experimento n° 2 – Aço 316L



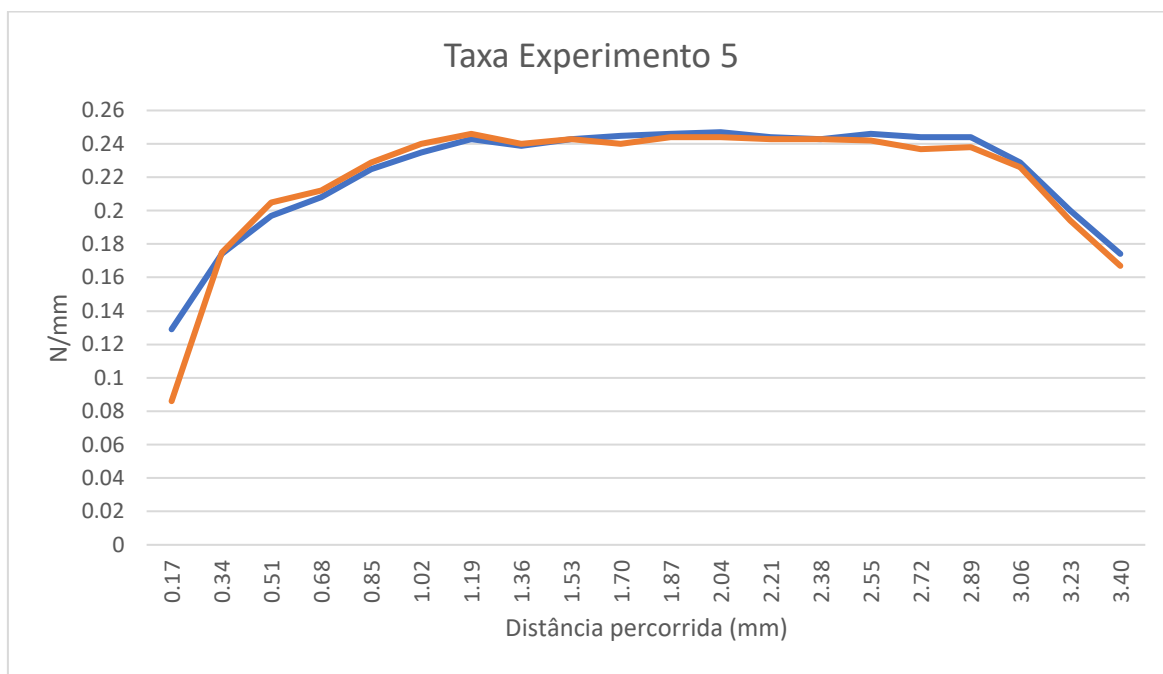
Ensaio A - Experimento nº 3 – INCONEL 718



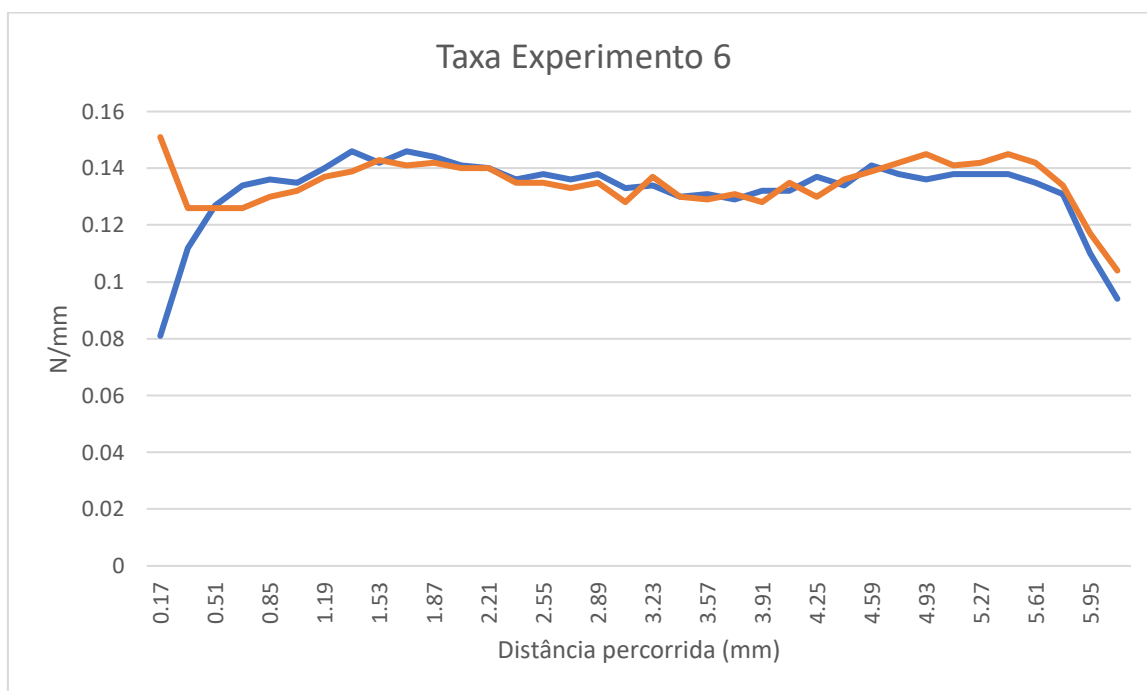
Ensaio A - Experimento nº 4 – INCONEL 718



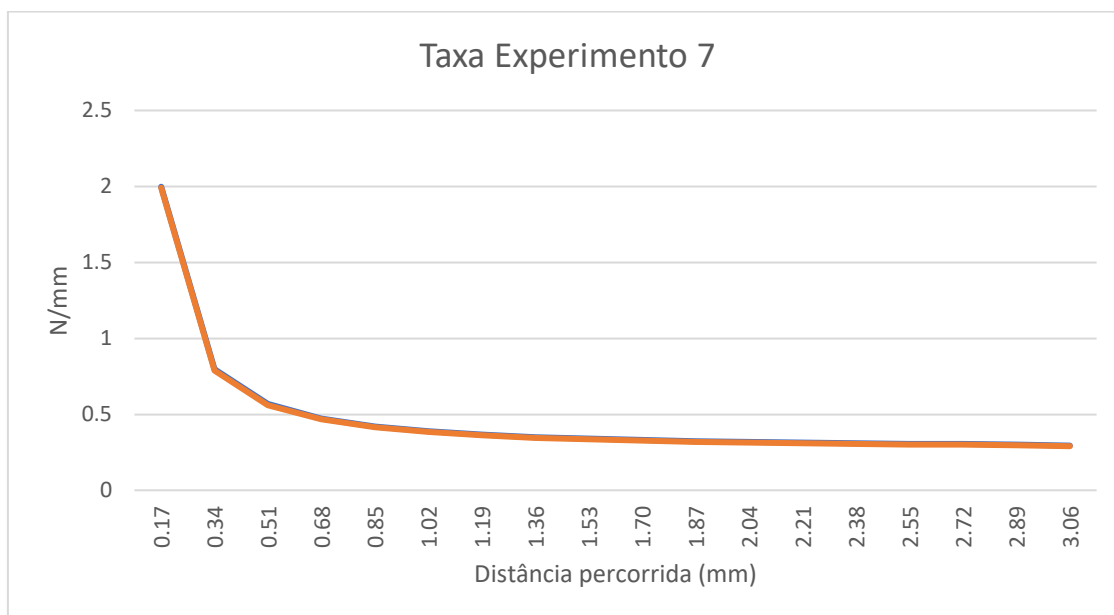
Ensaio B - Experimento nº 5 – Aço 316L



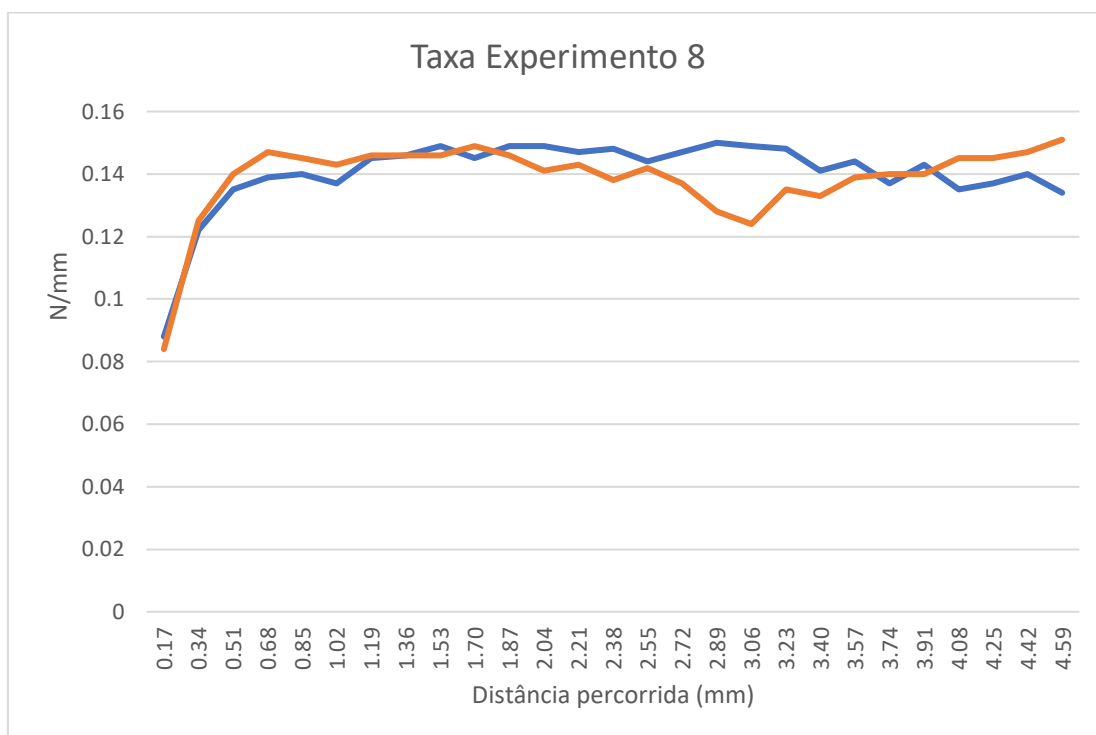
Ensaio B - Experimento nº 6 – Aço 316L



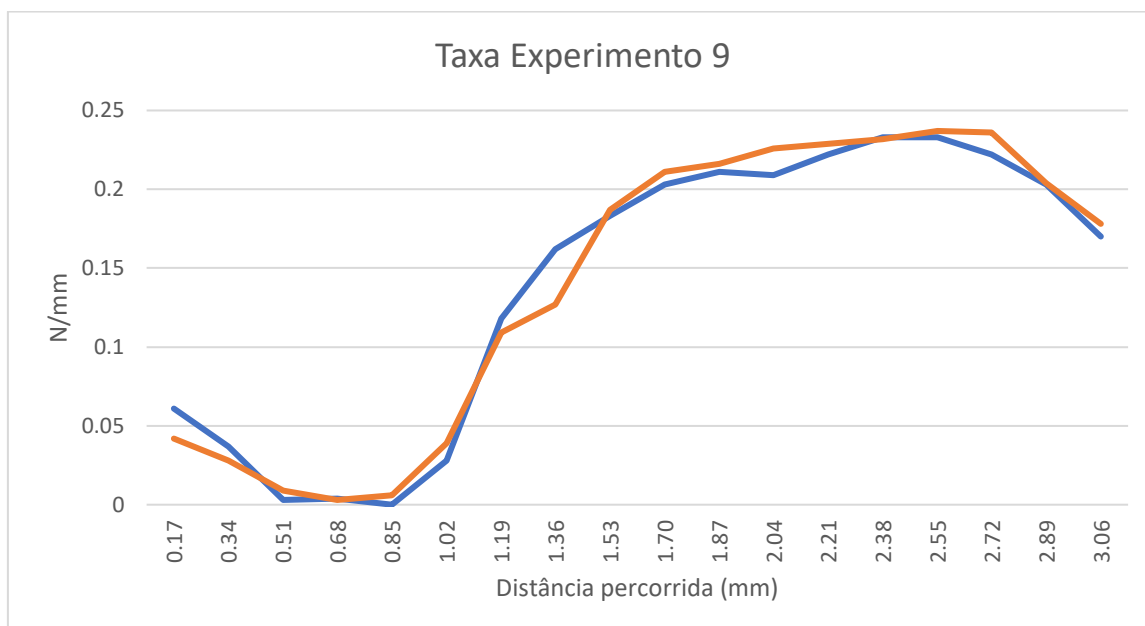
Ensaio B - Experimento nº 7 – INCONEL 718



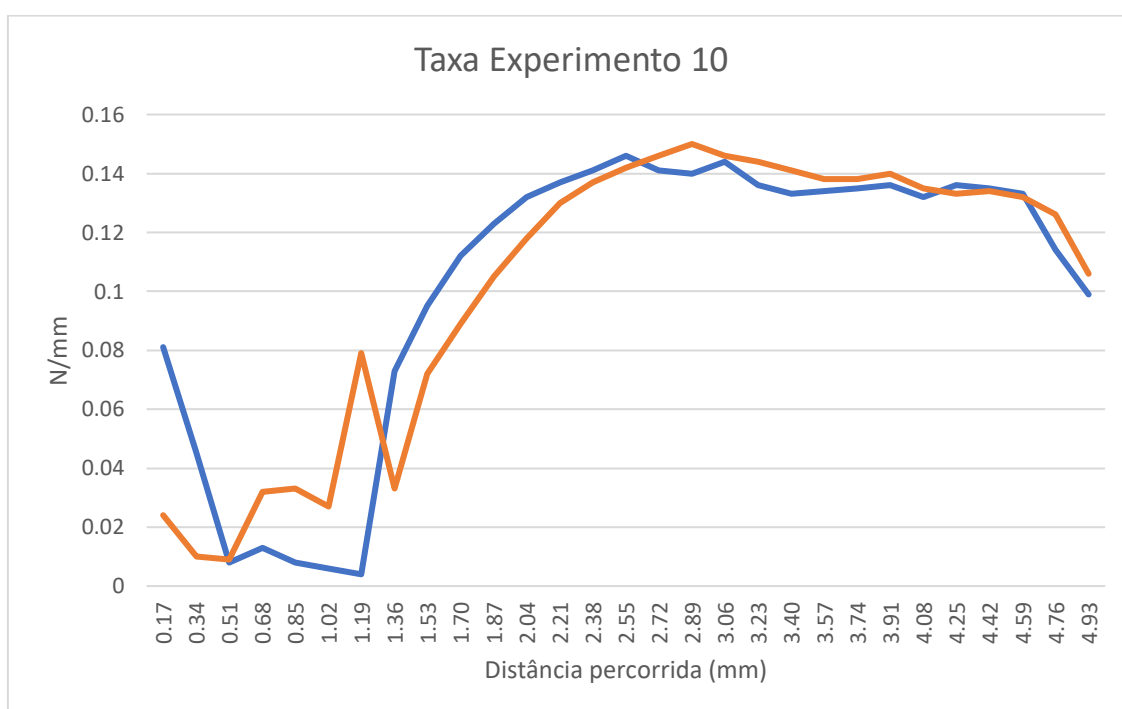
Ensaio B - Experimento nº 8 – INCONEL 718



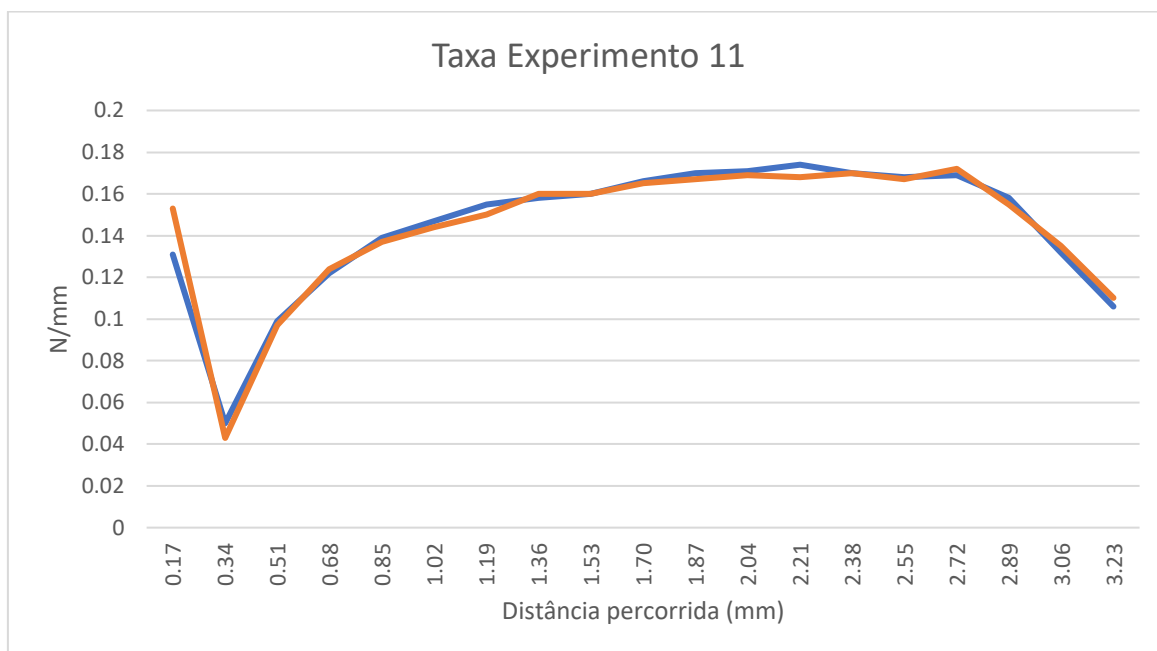
Ensaio C - Experimento n° 9 – Aço 316L



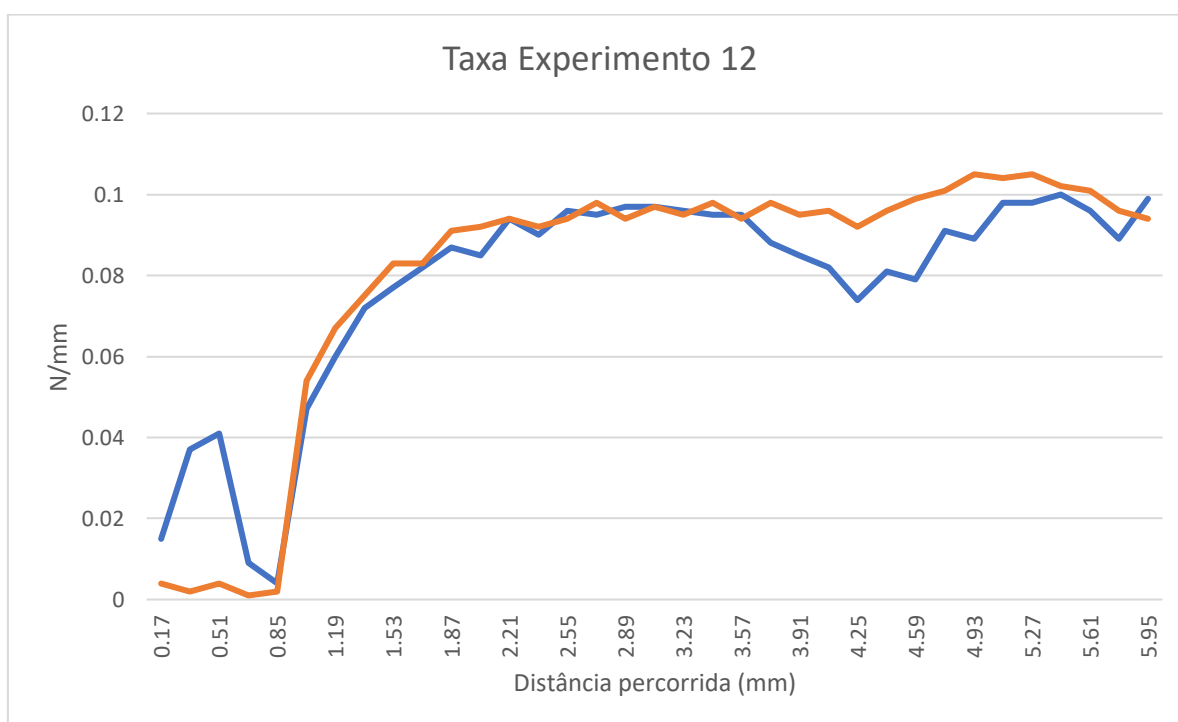
Ensaio C - Experimento n° 10 – Aço 316L



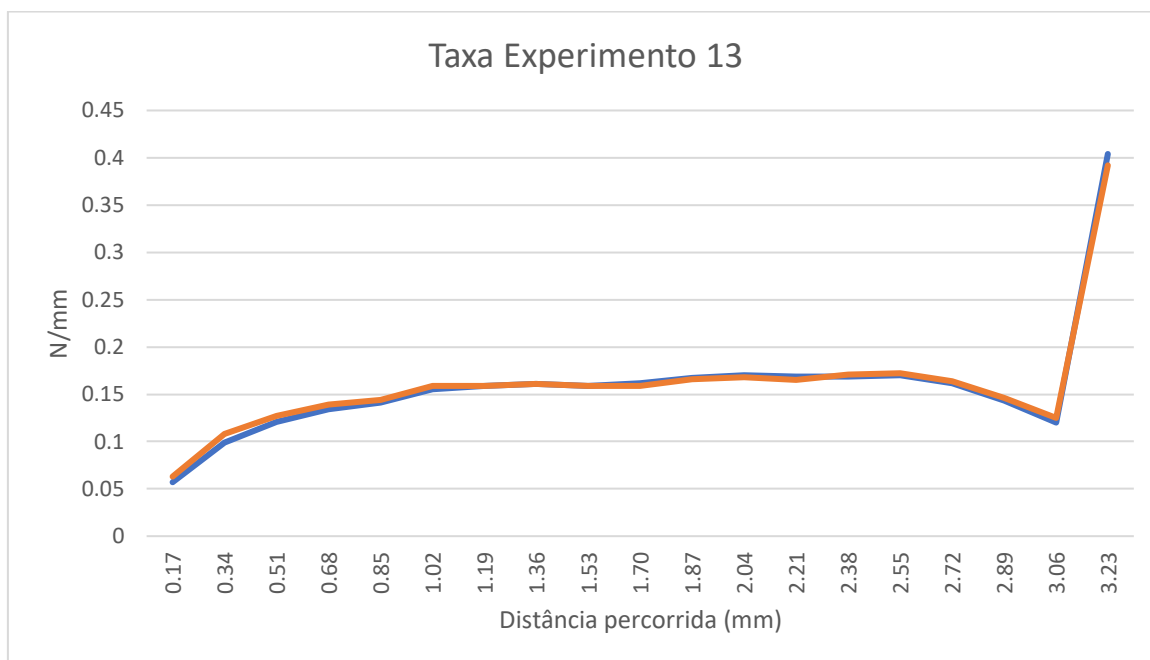
Ensaio C - Experimento n° 11 – INCONEL 718



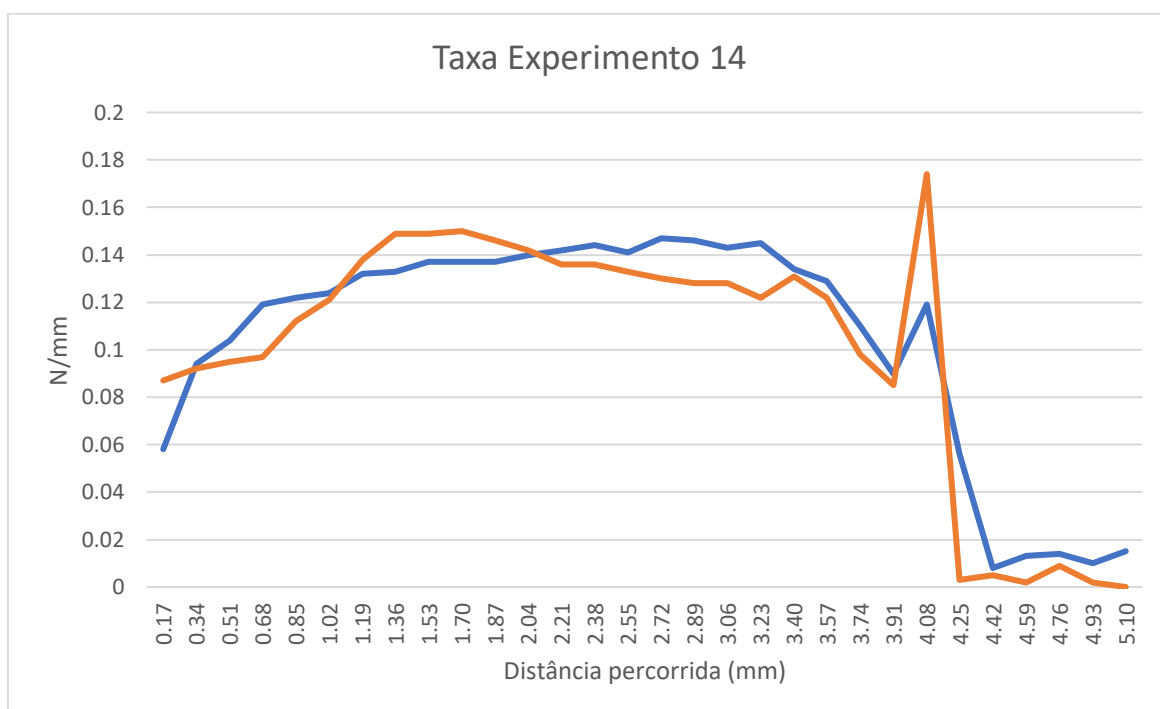
Ensaio C - Experimento n° 12 – INCONEL 718



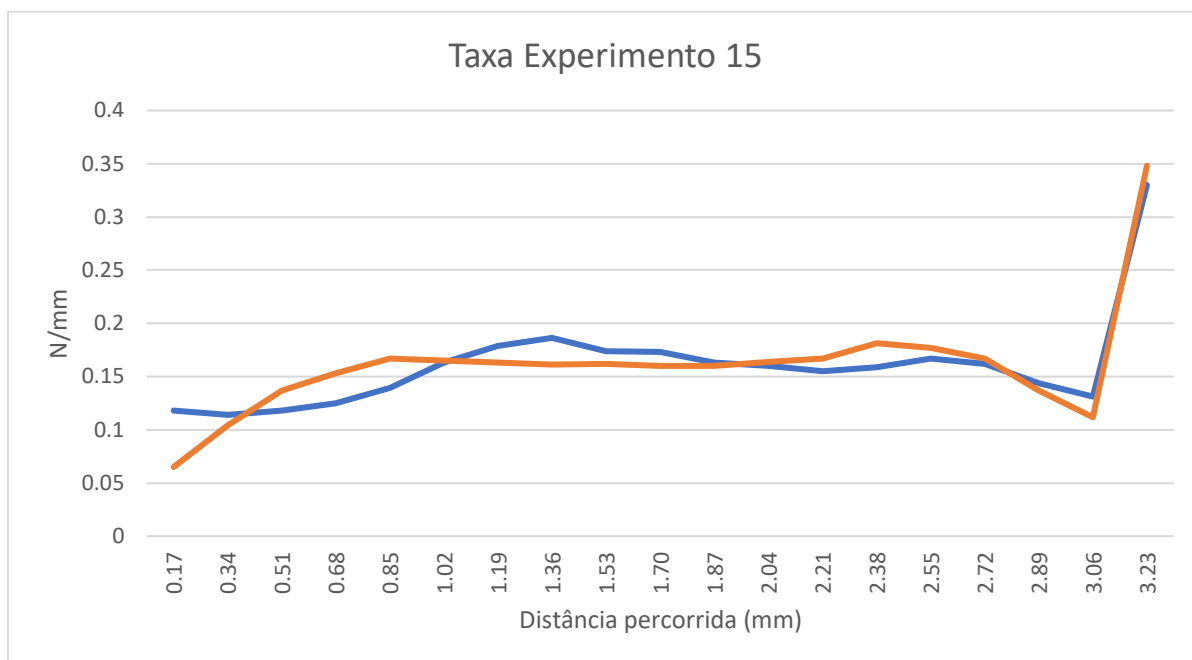
Ensaio D - Experimento n° 13 – Aço 316L



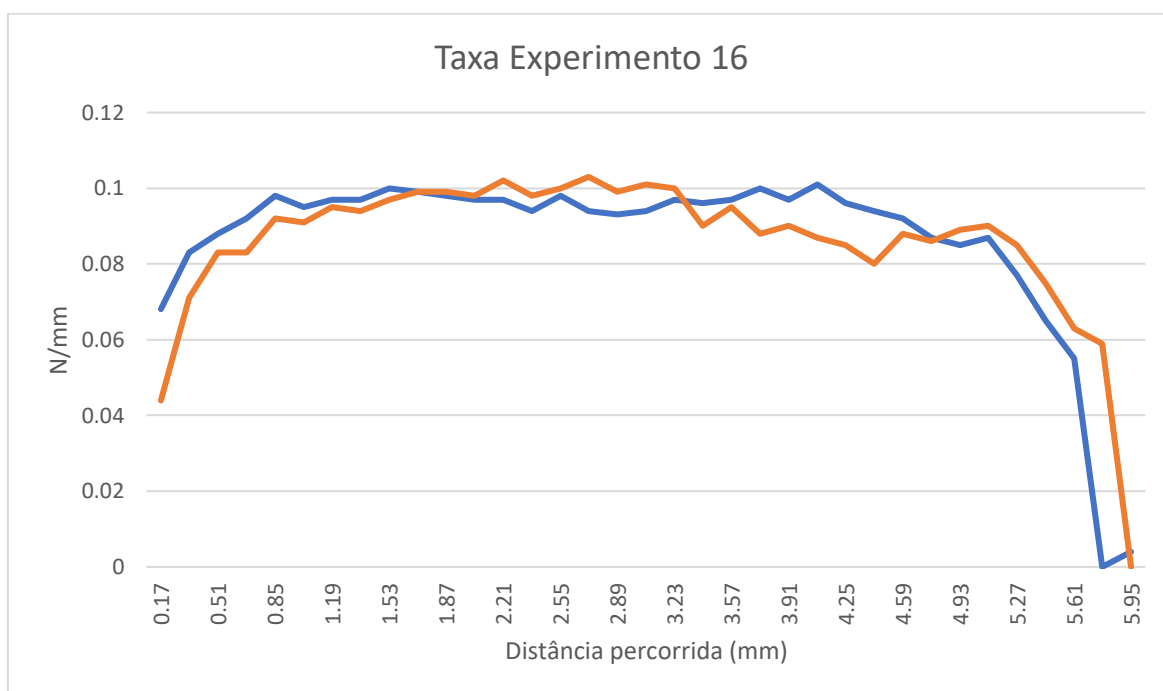
Ensaio D - Experimento n° 14 – Aço 316L



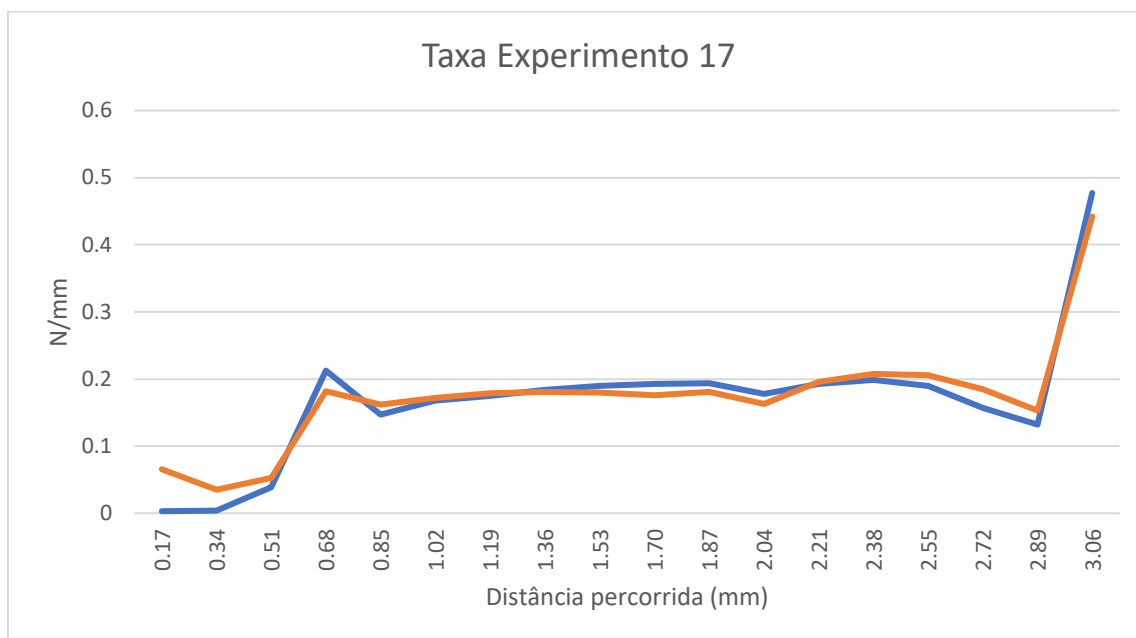
Ensaio D - Experimento n° 15 – INCONEL 718



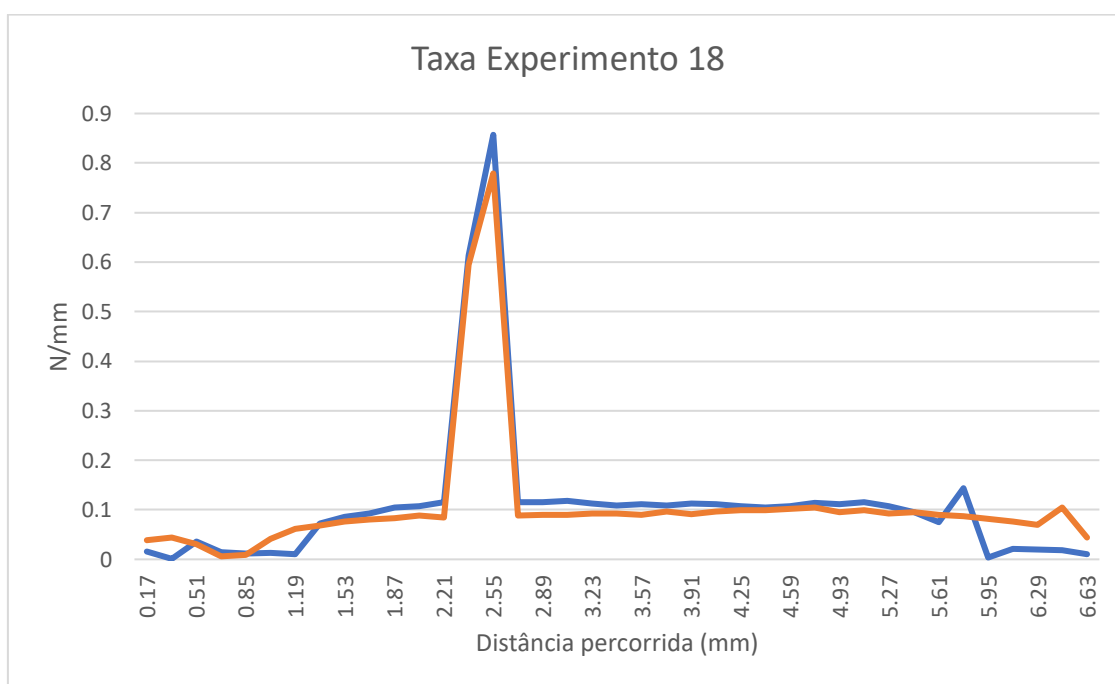
Ensaio D - Experimento n° 16 – INCONEL 718



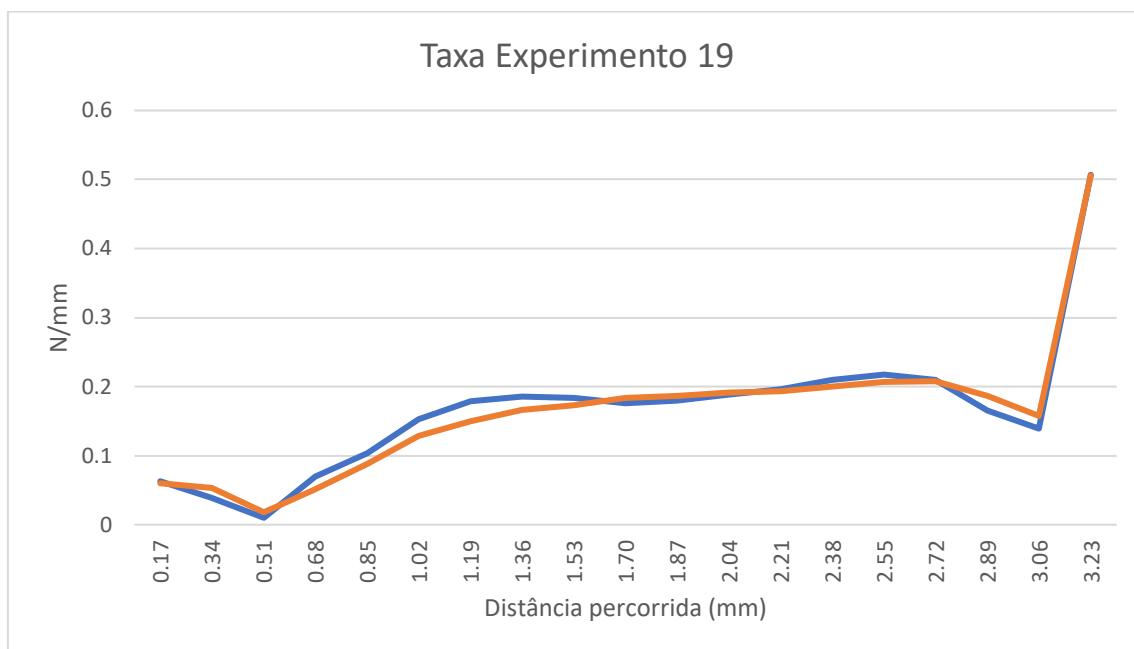
Ensaio E - Experimento n° 17 – Aço 316L



Ensaio E - Experimento n° 18 – Aço 316L



Ensaio E - Experimento n° 19 – INCONEL 718



Ensaio E - Experimento n° 20 – INCONEL 718

