

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

RUBENS SARNAGLIA DO AMARAL

**ENSAIOS DE RISCAMENTO EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316
SUBMETIDO A DIFERENTES TRATAMENTOS SUPERFICIAIS**

VITÓRIA
2015



RUBENS SARNAGLIA DO AMARAL

ENSAIOS DE RISCAMENTO EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316 SUBMETIDO A DIFERENTES TRATAMENTOS SUPERFICIAIS A PLASMA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica do Centro
Tecnológico da Universidade Federal
do Espírito Santo, como requisito
parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico.

Orientador: Antônio Cesar Bozzi, Dr.

VITÓRIA
2015

AMARAL, Rubens Sarnaglia do.

Ensaio de riscamento em aço inoxidável austenítico AISI 316 submetido a diferentes tratamentos superficiais a plasma / Rubens Sarnaglia do Amaral – 2015. 43f.

Orientador: Antônio Cesar Bozzi

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Ensaio de Riscamento. 2. Cementação e Nitretação. 3. Perfilometria. 4. Dureza ao risco. 5. Aços inoxidáveis austeníticos AISI 316. I. AMARAL, Rubens Sarnaglia do. II. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica. III. Ensaio de riscamento em aço inoxidável austenítico AISI 316 submetido a diferentes tratamentos superficiais a plasma.

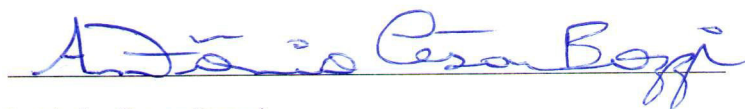
RUBENS SARGNALIA DO AMARAL

**ENSAIO DE RISCAMENTO EM AÇO INOXIDÁVEL AISI 316
SUBMETIDO A DIFERENTES TRATAMENTOS SUPERFÍCIAIS**

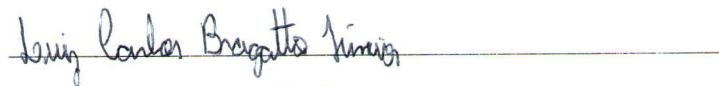
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 13 de Julho de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA:



Antônio Cesar Bozzi



Luiz Carlos Bragatto Junior



Patrícia Alves Barbosa

AGRADECIMENTOS

À Deus em primeiro lugar, por ter me ajudado e ter me dado força em todos os momentos.

À toda minha família, principalmente meus pais, que me deu apoio em toda minha vida até chegar nesse momento. Agradeço também a Monique Melo Andrade.

Ao meu professor e orientador, Dr. Antônio César Bozzi, por sua disponibilidade e apoio que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao mestrando Leandro Falqueto por ter me ajudado nas análises de topografia, Mateus Aguiar e Pedro Rosetto pelo treinamento a operar o equipamento de ensaio e Yukio Nishida por realizar a análise através do microscópio eletrônico (MEV).

Agradeço o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP –, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCTI, bem como da Petrobras.

Agradeço também a todos os outros que me ajudaram de alguma maneira na realização deste trabalho.

RESUMO

Aços inoxidáveis austeníticos possuem excelente resistência à corrosão em diversos meios. Porém, é bastante conhecido o fato de que esses aços apresentam um baixo limite de escoamento e também uma baixa resistência ao desgaste. Estes aços são usados como materiais resistentes à corrosão em vários setores da indústria do petróleo. Por esta razão, técnicas de engenharia de superfície para a melhoria da resistência ao desgaste têm sido desenvolvidas, dentre elas, os processos de endurecimento superficial a plasma. Neste contexto os conjugados dúplex, modificados por nitretação e/ou carbonetação a plasma com posterior deposição de um recobrimento tribológico de (Cr,Al)N por deposição física de vapor assistida por plasma (PAPVD - Plasma Assisted Physical Vapor Deposition), são um dos possíveis candidatos que visam atender os objetivos de aumento tanto da resistência à corrosão quanto ao desgaste. Para a avaliação do comportamento tribológico dos materiais, uma grande variedade de ensaios podem ser efetuados. Entre esses, temos o ensaio de riscamento (*Scratch test*) que é o objetivo desse trabalho, que simula um monoevento abrasivo através do riscamento da amostra com um indentador de geometria e dimensões conhecidas em condições controladas de carga normal e velocidade. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais (LCSM) na UFES numa máquina do tipo *UMT Multi-Specimen Test System* da CETR e análise posterior foi feita com fotos de microscópio ótico e eletrônico (MEV) e também através do perfilômetro *TalySurf CLI – 3D Surface profiling Systems* do fabricante *Taylor Hobson Precision*. Foi avaliado o comportamento dos revestimentos em questão para aços inoxidáveis austeníticos AISI 316. Foi possível concluir que em relação ao substrato houve uma melhoria na dureza superficial, mas os diferentes tratamentos entre si apresentaram resultados iguais.

Palavras chave: Ensaio de Riscamento. Carbonetação. Nitretação. Perfilometria. Dureza ao Risco. Aço inoxidável AISI 316.

ABSTRACT

Austenitic stainless steels have an excellent corrosion resistance on different environments. However, it is well known that these steels possess low yield strength and low wear resistance. These steels are used as corrosion resistant materials on different areas of oil industries. For this reason, engineering surface techniques for the improvement of wear resistance have been developed, between them, the hardening processes of surfaces by plasma. On this context, the duplex stainless steels, formed by nitriding and/or carburizing by plasma with later deposition of a tribological coating of (Cr,Al)N by Plasma Assisted Physical Vapor Deposition (PAPVD), are one of the possibilities that are willing to meet the objectives of increment both in corrosion and wear resistance. For an evaluation of the tribological behavior of materials, a big variety of tests can be made. Between them, there is the Scratch Test, which is the objective of this work, it stimulates one single abrasive event through the scratch of the subject with an indenter of known geometry and dimension in controlled conditions of normal load and speed. The tests were performed in the Materials Surface Characterization Laboratory (LCSM) on UFES in one machine of the type UMT Multi-Specimen Test System of CETR and the following analysis of results was done with photos from optical and electronic microscopes and also with perfilometer TalySurf CLI – 3D Surface profiling Systems from the manufacturer Taylor Hobson Precision. It was evaluated the behavior of coatings on AISI 316 austenitic stainless steels. It was possible to conclude that the deposition of coatings increased the wear resistance of the substrate, but they had about the same results in terms of scratch hardness.

Keywords: Scratch Test. Carburizing. Nitriding. Perfilometry. Scratch Hardness. AISI 316 Stainless Steels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Correlação entre escala Mohs e dureza a indentação [5]	13
Figura 2- a) Risco de passe único, b) risco de múltiplos passes e c) risco em trajetórias circulares [5]	13
Figura 3- a) Configuração de pêndulo e b) com indentador na periferia de um disco girante [5]	14
Figura 4- Seção transversal do risco e a definição da fração f_{ab} [8].....	15
Figura 5- a) Vista lateral do teste e b) vista superior [9].....	19
Figura 6- Esquema básico de um equipamento de nitretação a plasma [10].....	22
Figura 7- Aparato usado na cementação a plasma [12]	24
Figura 8- Equipamento utilizado para realizar o ensaio de riscamento.....	27
Figura 9- Detalhes do indentador de diamante	28
Figura 10 – Largura do risco de 10N na amostra S4 (microscópio ótico)	29
Figura 11 - Foto do Risco no MEV	29
Figura 12 - Esquema de obtenção de largura	30
Figura 13- Equipamento utilizado para realizar as análises topográficas das amostras	31
Figura 14- Perfil do risco com a definição da zona de interferência[13].....	32
Figura 15 – Determinação do perfil médio dos riscos do substrato submetido a uma carga de 2N.....	32
Figura 16- Determinação das áreas do sulco e de material acumulado nas bordas do risco a partir do perfil médio	33
Figura 17– Visão 3D do risco da carga de 19N na amostra S0.....	33
Figura 18- Largura do risco com força normal de 10N na amostra S0 (MEV)	35
Figura 19- Risco obtido com força normal de 19 N na amostra S2	36
Figura 20- Dureza ao risco (MEV)	37
Figura 21- Dureza ao risco (Microscópio Ótico)	37
Figura 22- Perfil da superfície obtida após utilização do perfilômetro	38
Figura 23- Esquema da obtenção da relação f_{ab} na amostra S3 (risco de 19N).....	39
Figura 24- Relação das áreas removidas e deformadas f_{ab}	39
Figura 25- Coeficiente de arraste	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição típica do aço inoxidável AISI 316 em % peso [10].....	21
Tabela 2- Sistemas utilizados nos ensaios[3].....	25
Tabela 3- Composição química percentual da amostra do substrato [3]	25
Tabela 4- Microdureza Vickers (HV) de todos os sistemas [3]	26
Tabela 5- Microdureza Knoop (HK) de todos os sistemas [3].....	26
Tabela 6- Parâmetros utilizados nos ensaios de riscamento	28
Tabela 7- Dureza ao risco utilizando larguras obtidas através do MEV	36
Tabela 8- Dureza ao risco utilizando larguras obtidas através do Microscópio ótico.....	37
Tabela 9- Fator de Relação das áreas removidas e deformadas f_{ab}	39
Tabela 10– Coeficiente de arraste F_x/F_z	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 ENSAIOS DE RISCAMENTO	12
2.1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA E ORIGEM DO TESTE E A ESCALA MOHS	12
2.1.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ENSAIOS QUANTO À VELOCIDADE.....	13
2.1.3 PARÂMETROS BÁSICOS DO TESTE	14
2.2 ANÁLISE TOPOGRÁFICA DO RISCO	15
2.3 NORMA PADRÃO PARA DETERMINAR O NÚMERO DE DUREZA AO RISCO DE MATERIAIS UTILIZANDO INDENTADOR DE DIAMANTE.....	16
2.3.1 SUMÁRIO DO TESTE [5].....	16
2.3.2 SIGNIFICADO E USO DA NORMA.....	17
2.3.3 EQUIPAMENTO	17
2.3.4 PROCEDIMENTO	17
2.3.5 DEFINIÇÃO DOS TERMOS ESPECÍFICOS DA NORMA.....	18
2.3.5.1 NÚMERO DE DUREZA AO RISCO (SCRATCH HARDER NUMBER)	18
2.3.5.2 FORÇA DE RISCAMENTO.....	19
2.4 DESCRIÇÃO DO MATERIAL	20
2.4.1 AÇOS INOXIDÁVEIS	20
2.4.2 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS	20
2.5 TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS	21
2.5.1 NITRETAÇÃO A PLASMA	22
2.5.2 CEMENTAÇÃO A PLASMA.....	23
3 METODOLOGIA	25
3.1 SISTEMAS SUBMETIDOS AO ENSAIO	25
3.2 ENSAIOS DE RISCAMENTO	27
3.2.1 - MEDIDA DA LARGURA DO RISCO	28
3.3 ANÁLISE TOPOGRÁFICA	30
3.3.1 DETERMINAÇÃO DO PERFIL DO RISCO.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
5 CONCLUSÕES	41
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	42
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

É bastante conhecido o fato de que aços inoxidáveis austeníticos apresentam baixo limite de escoamento, embora possuam alta taxa de encruamento devido a falhas de empilhamento de energia baixa, características de uma estrutura CFC (cúbica de face centrada) [1]. Mesmo apresentando excelente resistência à corrosão em vários meios é notório a baixa resistência ao desgaste destes materiais. Quando em contato com outros materiais e/ou consigo mesmo apresentam desgaste severo devido a fortes junções produzidas entre as superfícies em contato e severa deformação plástica superficial [2].

Estes aços são usados como materiais resistentes à corrosão em vários setores da indústria do petróleo. Por esta razão, técnicas de engenharia de superfície para a melhoria dessas propriedades têm sido desenvolvidas, dentre elas, os processos de endurecimento superficial a plasma. Neste contexto os conjugados dúplex, modificados por nitretação e/ou carbonetação a plasma com posterior deposição de um recobrimento tribológico de (Cr,Al)N por deposição física de vapor assistida por plasma (PAPVD - Plasma Assisted Physical Vapor Deposition), são um dos possíveis candidatos que visam atender os objetivos de aumento tanto da resistência à corrosão quanto ao desgaste [3].

Para a avaliação do comportamento tribológico dos materiais, uma grande variedade de ensaios podem ser efetuados. Dependendo do sistema tribológico e do(s) mecanismo(s) predominante(s) de desgaste um ensaio específico será selecionado, para a comparação e o ranqueamento dos materiais candidatos em uma determinada aplicação.

Entre esses, temos o ensaio de riscamento (*Scratch test*), que simula um monoevento abrasivo através do riscamento da amostra com uma partícula de geometria e dimensões conhecidas em condições controladas de carga normal, velocidade, etc.

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico-tribológico de amostras de aço inoxidável austenítico AISI 316 submetidas à tratamentos de nitretação e/ou cementação a plasma com posterior deposição de um recobrimento tribológico de (Cr,Al)N por deposição física de vapor assistida por plasma através de ensaios de riscamento em várias configurações, seguido por análises de topografia para melhor avaliar a resposta do material ao risco. Este trabalho é uma continuação direta do trabalho de Pedro Rosetto de Faria[4].

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENSAIOS DE RISCAMENTO

Existem diversos métodos de caracterização tribológica dos materiais e de análise de desgaste e abrasão. Um deles é o Ensaio de Riscamento (*Scratch Test*, também conhecido como esclerometria linear). Este método é tipicamente utilizado para [5]:

- Determinar a microdureza ao risco do material;
- Caracterizar os mecanismos de desgaste;
- Comparar a resistência ao desgaste abrasivo;
- E medir a adesão dos revestimentos.

Este ensaio simula um monoevento do teste de abrasão, pois se trata de um teste de abrasão, entre dois corpos, de passe único e com apenas uma partícula abrasiva, no caso o indentador agindo sobre a superfície, enquanto que em outros testes de abrasão há inúmeras partículas abrasivas e vários passes destas sobre a superfície (múltiplos eventos). Uma análise desse teste indica que ele é mais utilizado qualitativamente do que quantitativamente [5].

2.1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA E ORIGEM DO TESTE E A ESCALA MOHS

A mais antiga referência de escala de dureza ao risco foi desenvolvida por Reaumur em 1722 [6]. Ele mediu a dureza de uma substância como o ponto onde teve início o riscamento de uma barra tratada termicamente cuja dureza decresceu de uma extremidade a outra.

Em 1822, o australiano Mohs desenvolveu a primeira medida semi quantitativa para a dureza dos minerais, arranjada em ordem de resistência que um determinado mineral oferece ao risco. A escala conta com 10 minerais. O mais alto nesta escala pode riscar todos os outros com número de Mohs mais baixo[6].

Como o riscamento e o processo de indentação são determinados pelas propriedades plásticas do material, há uma correlação entre a dureza de Mohs e a dureza ao risco para minerais, como mostrado na figura 1[6].

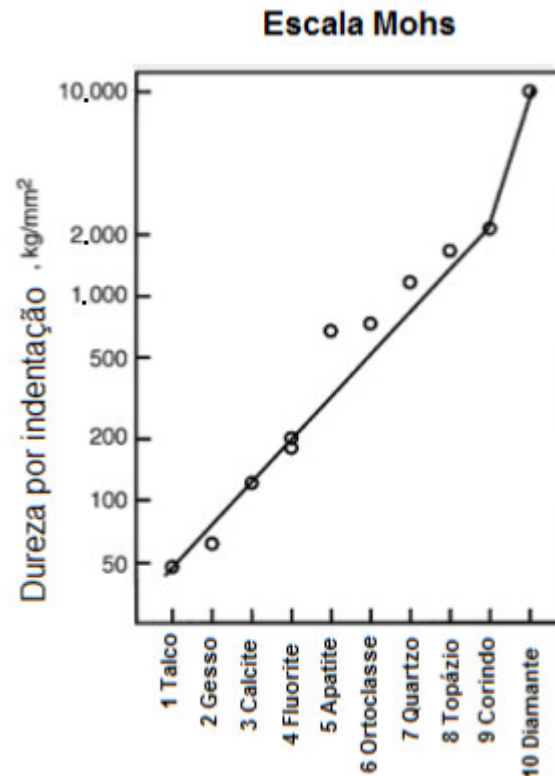


Figura 1 - Correlação entre escala Mohs e dureza a indentação [5]

2.1.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ENSAIOS QUANTO À VELOCIDADE

O teste de riscamento pode ser classificado em duas categorias, baixa e alta velocidade, em relação à velocidade do indentador sobre a superfície a ser riscada[5].

1. Baixa velocidade: O elemento riscador (indentador) normalmente é montado para se mover ao longo da superfície a velocidades de poucos milímetros por segundo, gerando assim um sulco de passe único. O elemento pode ser configurado também de forma a gerar um sulco de múltiplos passes, ou ainda de forma a deslizar em trajetórias circulares. As três configurações estão mostradas na figura 2[5].

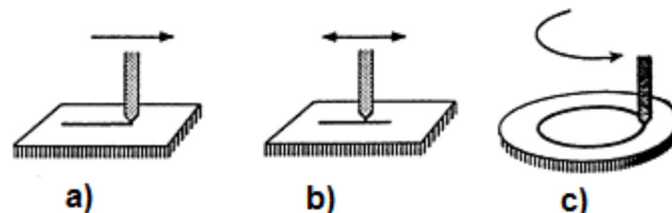


Figura 2- a) Risco de passe único, b) risco de múltiplos passes e c) risco em trajetórias circulares [5]

2. Alta velocidade: nesta configuração tanto simples como múltiplos passes podem ser feitos. Duas formas que podem ser realizadas estão ilustradas na figura 3: com o

indentador montado em um pêndulo (esclerometria pendular) ou na periferia de um disco girante. A amostra fica num plano que pode ser fixo ou apresentar movimento[5].

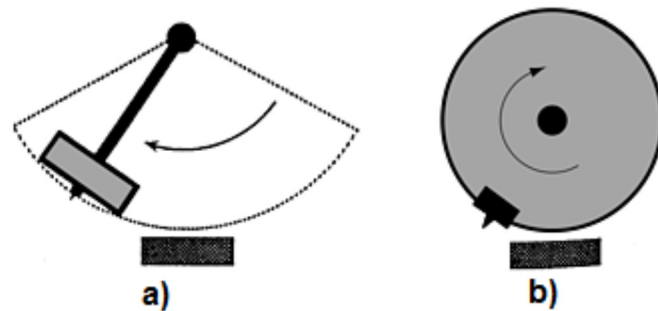


Figura 3- a) Configuração de pêndulo e b) com indentador na periferia de um disco girante [5]

2.1.3 PARÂMETROS BÁSICOS DO TESTE

Quando o ensaio de riscamento é utilizado para determinar a dureza ao risco, o teste deve ser realizado em condições padrões e controladas. Tendo em vista essa necessidade de padronização alguns parâmetros são estabelecidos da seguinte forma[5]:

a) Material do indentador: na maioria dos casos usa-se uma ponta de diamante para minimizar o desgaste e consequente influência deste no mecanismo de riscamento. Outros materiais, como safira e o carbeto de tungstênio também podem ser usados.

b) Forma do indentador: a forma normalmente é esférica, cônica ou triangular piramidal. O raio da ponta deve ser de pelo menos uma ordem de grandeza menor do que a profundidade do risco. Aqueles do tipo cônico ou piramidal são bastante usados no ensaio por produzirem deformação plástica mesmo em materiais frágeis.

c) Orientação do indentador em relação à direção de riscamento: a diagonal do indentador fica alinhada paralelamente com a direção do sulco para reduzir a fratura em materiais frágeis e a formação de cavacos em materiais dúcteis.

d) Preparação da amostra: a superfície da amostra deve ser polida para minimizar a influência da rugosidade nos resultados do teste. Rugosidade esta que deve ser de uma ordem de grandeza menor do que a profundidade do risco.

e) Velocidade de riscamento: a velocidade deve ser controlada para ser constante durante o teste.

f) Comprimento do risco: o comprimento do risco deve ser de pelo menos 5 mm para evitar os efeitos associados às bordas formadas na amostra e obter dados de estado estacionário.

g) Carga ou profundidade: tanto a carga como a profundidade podem ser controladas ao longo do teste. A profundidade é controlada alinhando a direção do risco paralelamente com a superfície do material ensaiado. Células de carga podem ser usadas para monitorar as cargas e um padrão de testes para mantê-la constante.

h) Número de passes: é o número de vezes que o indentador passa pelo mesmo risco durante o ensaio. Normalmente, utiliza-se o ensaio de passe único.

2.2 ANÁLISE TOPOGRÁFICA DO RISCO

Durante o ensaio de riscamento, dependendo da carga normal aplicada na amostra e das características dessa, diferentes fenômenos podem ocorrer. Segundo Stroud e Wilman [7], durante a abrasão de materiais macios, somente uma parte do volume do desgaste produzido por partículas abrasivas é removida em forma de debris. O restante é deslocado plasticamente para as bordas do sulco.

Em um ensaio de riscamento de passe único, a razão entre o volume de material removido como debris de desgaste e o volume do sulco criado pode ser descrita pela fração da equação (2.1) [8]:

$$f_{ab} = \frac{A_v - (A_1 + A_2)}{A_v} \quad (2.1)$$

Onde:

A_v = área do sulco gerado

A_1 e A_2 = área do material deslocado para as bordas do sulco por deformação plástica

Para melhor compreensão desta análise, a figura 4 permite visualizar estas áreas que definem a relação f_{ab} .

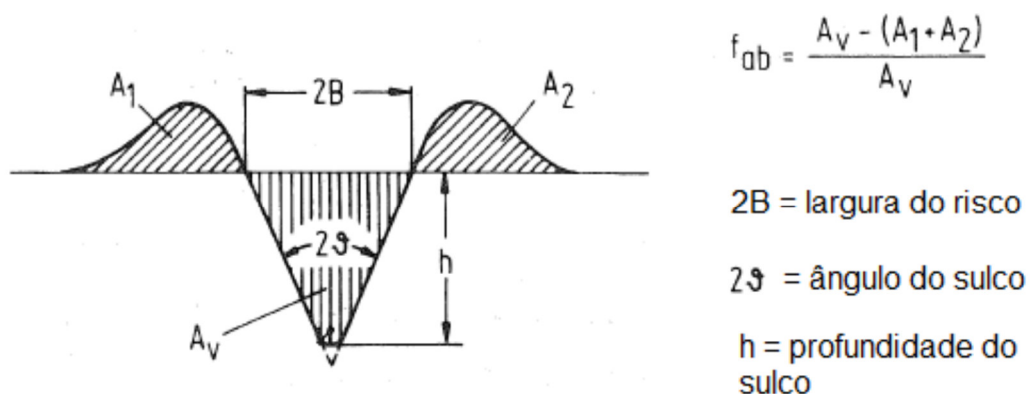


Figura 4- Seção transversal do risco e a definição da fração f_{ab} [8]

A partir desta relação podemos classificar alguns casos extremos da seguinte forma [8]:

- Para $f_{ab} = 0$, ocorre o chamado Microsulcamento Puro, ou seja, o material é deslocado para as bordas do sulco, mas não é removido. Neste caso a soma das áreas A_1 e A_2 é igual a A_v .
- Por outro lado, para $f_{ab} = 1$, ocorre o que se chama de Microcorte Puro. Neste caso, não há deslocamento de material para as bordas do sulco, ou seja, todo o material correspondente ao volume A_v é retirado na forma de micro cavacos ou partículas de desgaste.
- Para $f_{ab} > 1$, ocorre o chamado Microtrincamento, só é possível em materiais frágeis e nesta situação, o volume de material retirado como partículas de desgaste é maior do que o volume teórico do sulco devido ao indentador.

2.3 NORMA PADRÃO PARA DETERMINAR O NÚMERO DE DUREZA AO RISCO DE MATERIAIS UTILIZANDO INDENTADOR DE DIAMANTE

A norma ASTM G171-03 [9] é usada para determinar os parâmetros necessários na determinação do número de dureza ao risco de materiais utilizando indentador de diamante Rockwell C.

Segundo esta norma, o teste de dureza ao risco não é projetado para determinar a adesão de recobrimento, nem para o uso com outro tipo de indentador diferente do específico (ponta de diamante).

2.3.1 SUMÁRIO DO TESTE [5]

O teste se baseia na realização de um risco em uma superfície sólida através do movimento de uma ponta de diamante de geometria específica em uma trajetória pré-definida, aplicando força e velocidade constantes. Mede-se o valor da largura do risco, e este valor é utilizado para estimar o número de dureza ao risco.

A força de riscamento pode ser medida durante o teste e usada para determinar o coeficiente de arraste do indentador, que se trata de uma medida adimensional entre a força normal aplicada pela resistência da superfície de teste.

Normalmente o teste é realizado sem lubrificação da amostra e a temperatura ambiente.

Efeitos da umidade do ar e outras condições atmosféricas podem influenciar nos resultados dependendo da sensibilidade do material. Caso necessário, devem ser tomadas precauções para controle das condições ambiente, e tais medidas devem ser relatadas.

2.3.2 SIGNIFICADO E USO DA NORMA

O teste é desenvolvido com o objetivo de determinar a resistência da superfície sólida à deformação permanente quando submetida à ação de uma força pontual pela ponta do indentador (*stylus tip*).

O número de dureza ao risco envolve uma diferente combinação de propriedades da superfície, pois o indentador move-se tangencialmente em relação a esta.

O teste pode ser realizado com diferentes materiais, como metais, ligas e alguns polímeros. O critério principal envolve a determinação de um risco que pode ser medido na superfície testada, sem que esta sofra fratura catastrófica, fragmentação e ejeção de material devido a impacto ou pressão (*spalling*), ou delaminação excessiva na superfície.

2.3.3 EQUIPAMENTO

Em uma descrição geral o equipamento consiste em: um indentador rígido (diamante), uma célula de carga responsável pela aplicação da força normal em um meio de medir a largura do risco realizado.

- Indentador: este deve ser cônico, com ângulo de ponta de $120^\circ \pm 5^\circ$, e o cone deve terminar de forma hemisférica com $200 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ de raio. O material deve ser em diamante. Este indentador é o mesmo utilizado nos ensaios de dureza *Rockwell C*.
- Sistema de medida da largura: consiste em um sistema de imagem capaz de medir a largura do risco com precisão pelo menos 2%.

Todo o equipamento deve estar devidamente calibrado.

2.3.4 PROCEDIMENTO

Visando padronizar os ensaios, alguns procedimentos devem ser feitos a fim de obter resultados confiáveis e satisfatórios. Tais procedimentos são descritos a seguir.

- Preparação da amostra: a superfície deve ser polida para facilitar medição e observação da largura do risco. Deve ainda apresentar baixa rugosidade.
- Limpeza da amostra: a superfície deve estar livre de contaminantes como impressões digitais, graxas, etc. Caso algum método de limpeza seja realizado este deve ser relatado.

- Inspeção da ponta do indentador: para garantir que não haja defeitos como trincas, desgaste excessivo ou material aderido em outros testes. Presença de óleo no indentador pode lubrificar a sua superfície e reduzir o número aparente de dureza ao risco. Caso a ponta do indentador esteja danificada ou sofrendo perda de material em forma de cavaco, pode ocorrer um aumento da força de riscamento e produzir deformação anormal na superfície.
- Força normal: deve ser escolhida de tal forma que produza um sulco mensurável na amostra, mas não deve ser tão elevada a ponto de causar grandes danos superficiais como fratura e delaminação.
- Comprimento do risco: deve ser de pelo menos 5 mm.
- Velocidade: deve ser constante e variar entre 0,2 e 5 mm/s. O uso de baixas velocidades de riscamento minimiza possíveis efeitos de aquecimento por atrito.
- Distância entre riscos: deve ser de pelo menos 5 larguras (paralelamente).
- Medida da largura: utilizando um microscópio, esta deve ser medida em 3 posições aproximadamente equidistantes para cada risco. Devido a efeitos de aceleração e desaceleração, essas medidas não devem ser tomadas próximas às extremidades do risco.

2.3.5 DEFINIÇÃO DOS TERMOS ESPECÍFICOS DA NORMA

2.3.5.1 NÚMERO DE DUREZA AO RISCO (SCRATCH HARDER NUMBER)

Medido em unidades de força por área, caracteriza a resistência de uma superfície sólida a penetração usando um indentador típico submetido à força e velocidade constantes. É calculado segundo a equação (2.2):

$$HS_p = \frac{\text{Força Normal}}{\text{Área Projetada}} \quad (2.2)$$

HS_p = número de dureza ao risco

A partir da expressão (2.2) há duas maneiras para calcular o número de dureza ao risco, ambas apresentando o mesmo resultado. A primeira segue a expressão a seguir e utiliza uma constante geométrica:

$$HS_p = \frac{kP}{w^2} \quad (2.3)$$

k = constante geométrica

P = força normal aplicada [gf]

w = largura do risco [μm]

A constante k pode ser obtida através de fatores de correção, com HS_p em GPa, P em grama-força e w em μm . Assim, define-se:

$$K=24,98$$

A segunda maneira pode ser explicada a partir da figura 5. A área projetada na área de contato tem o formato de um semicírculo cujo diâmetro é igual à largura do risco como mostra a figura 5 b) [9].

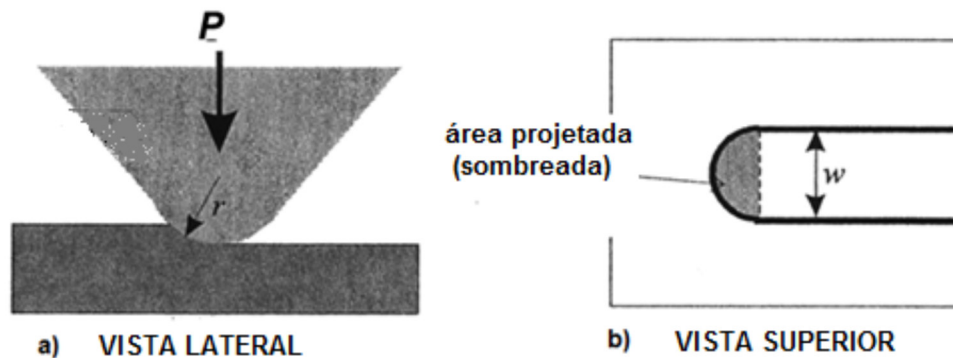


Figura 5- a) Vista lateral do teste e b) vista superior [9]

Dessa forma chegamos a seguinte expressão para o cálculo do número de dureza ao risco, onde d é o diâmetro do semi-círculo da área projetada:

$$HS_p = \frac{P}{\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} = \frac{8P}{\pi w^2} \quad (2.4)$$

2.3.5.2 FORÇA DE RISCAMENTO

Representa a força que se opõe ao movimento relativo e é perpendicular a força normal exercida pelo indentador.

2.3.5.3 COEFICIENTE DE ARRASTE DO INDENTADOR (STYLUS DRAG COEFFICIENT)

Este coeficiente é uma relação adimensional entre a força de riscamento e a carga normal aplicada, e pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$C_a = \frac{F_r}{P} \quad (2.5)$$

C_a = coeficiente de arraste do indentador

F_r = força de riscamento [N]

P = força normal [N]

O coeficiente de arraste do indentador (C_a) é similar por definição, mas não a mesma coisa, ao coeficiente de atrito por deslizamento. Ele se refere especificamente à resistência que a superfície riscada oferece ao deslocamento de material realizado pelo indentador de formato específico.

2.4 DESCRIÇÃO DO MATERIAL

2.4.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis podem ser definidos como sendo ligas ferrosas com teor de cromo de pelo menos 11% em peso. São altamente resistentes a corrosão (oxidação superficial) em uma variedade de ambientes, especialmente a atmosfera ambiente [1].

O cromo é o elemento que confere a resistência à corrosão ao aço inox, pois na presença de oxigênio forma uma camada superficial muito fina, aderente e protetora, de óxido de cromo (Cr_2O_3). O mecanismo de proteção do aço inoxidável por essa película de óxido é chamado de “passivação”. Os elementos molibdênio e níquel, dissolvidos em solução sólida, expandem a faixa de passividade e tornam o aço inoxidável mais resistente à corrosão [1].

Os aços inoxidáveis são divididos em três classes com base na fase constituinte predominante na sua microestrutura. São elas: martensítica, ferrítica e austenítica [1].

2.4.2 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Nesta classe, o campo da fase austenita se estende até a temperatura ambiente. Nela temos o aço inoxidável AISI 316 que é uma liga austenítica com alta resistência à corrosão, bem como tem excelentes características para a modelagem e soldagem. O aço inoxidável AISI 316 é normalmente classificado em segundo lugar entre as ligas austeníticas em importância, sendo batida apenas pelo aço inoxidável AISI 304. O elemento de liga molibdênio fornece ao aço inoxidável AISI 316 melhora na resistência à corrosão e corrosão sob fresta de meios contaminados com cloro [1].

Embora seja considerado o tipo naval de aço inoxidável, o aço inoxidável AISI 316 é utilizado nas indústrias tais como automotiva, aeroespacial, construção, eletrônica e petroquímica. As aplicações comuns de aço inoxidável 316 incluem equipamentos de laboratório, equipamento de preparação de alimentos, trocadores de calor, recipientes de produtos químicos, acessórios para barco e telas soldadas. Outra vantagem do aço inoxidável 316 é a capacidade de manter a integridade mecânica em temperaturas extremamente altas ou muito baixas. A tabela 1 mostra a composição típica desta classe de aço [1].

Tabela 1- Composição típica do aço inoxidável AISI 316 em % peso [10]

C (máx.)	Cr	Ni	Mn(máx)	Si(máx.)	Outros
0,08	16-18	10-14	2,0	1,0	2-3 Mo

Como visto, estes aços são largamente utilizados como materiais resistentes à corrosão em vários setores da indústria. Entretanto, apresentam uma séria limitação onde também se exige alta resistência ao desgaste, atrito e deslizamento, devido à baixa dureza e a alta capacidade de formação de junções na superfície submetida ao processo de desgaste. [3]

Por este motivo, diversas técnicas de engenharia de superfície vêm sendo desenvolvidas. Dentre essas técnicas desenvolvidas visando aumentar a resistência mecânica e ao desgaste da superfície, as que envolvem endurecimento superficial por difusão a plasma tem se destacado ultimamente, pois atuam de forma a evitar falhas e melhorar o desempenho de diversos componentes quando sujeitos a aplicações em que seja necessário além de resistência a corrosão, elevada dureza e resistência ao desgaste [3].

2.5 TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS

Nesta seção, serão descritos os processos de nitretação e cementação a plasma ao qual o substrato (S0) foi submetido para a produção dos sistemas S1, S2, S3 e S4 como será melhor descrito e explicado na seção 3.1.

Outro método muito utilizado é o tratamento dúplex que se compõe de nitretação e/ou cementação a plasma seguido de recobrimentos de (Cr, Al)N por PAPVD (*Plasma Assisted Physical Vapour Deposition*). Neste caso, a camada nitretada ou cementada funciona como um suporte a fim de evitar que a camada de recobrimento que é muito dura fique em contato direto com o substrato. Dessa forma, evita-se o contato entre duas superfícies com grande diferença de durezas já que a camada suporte apresenta uma dureza intermediária.

Tratamentos superficiais termoquímicos são técnicas de adição, no estado sólido, de elementos, como C, N e B na superfície do material. São assim denominados, pois a difusão destes elementos só é significativa a altas temperaturas [11]. Através destes tratamentos é possível aumentar a dureza e a resistência ao desgaste da superfície, ao mesmo tempo em que o núcleo do material se mantém dúctil e tenaz. Eles podem ser realizados de diversas maneiras, como: líquida, gasosa, sólida e a plasma.

A introdução de carbono na superfície do aço, de modo que este, depois de temperado, apresente superfície mais dura é chamada de cementação. Já a introdução superficial de nitrogênio no aço pelo aquecimento do mesmo para formar uma camada dura de nitretos é chamada de nitretação [11].

2.5.1 NITRETAÇÃO A PLASMA

Nitretação a plasma é uma técnica de endurecimento de superfícies baseada na interação entre o plasma e a superfície metálica exposta [10]. A figura 6 mostra um equipamento típico de nitretação a plasma que é constituído basicamente de um sistema de vácuo, uma fonte de potência e um reator.

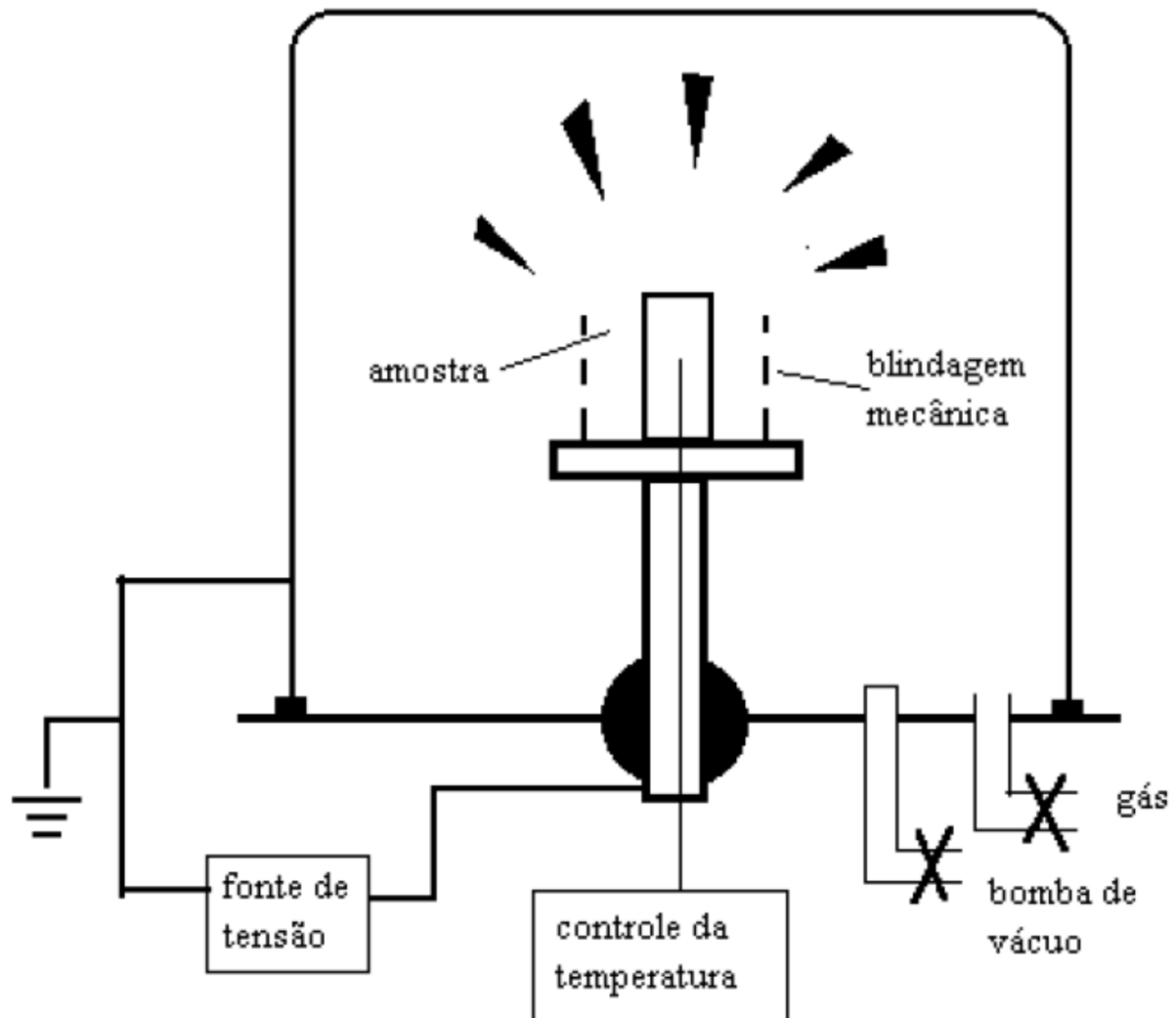


Figura 6- Esquema básico de um equipamento de nitretação a plasma [10]

O sistema de vácuo deve ser capaz de atingir em torno de 1.33 Pa de pressão e os gases introduzidos para tratamento devem ser controlados por válvulas. A fonte de potência possui uma saída de corrente contínua com uma voltagem máxima de aproximadamente 1500 V e uma corrente capaz de fornecer energia à peça para que ela seja aquecida a uma temperatura entre 300 e 600° C. No reator estão dois eletrodos onde o catodo é também o porta amostra. No reator devem existir ainda saídas para medida da pressão, temperaturas e outras variáveis desejadas para o melhor controle do processo[10].

Devem ter ainda entradas para a atmosfera nitretante, bomba de vácuo e outros acessórios que sejam necessários à nitretação da amostra. Inicialmente um vácuo de aproximadamente 1.33 Pa é produzido no reator. Aplica-se uma diferença de potencial

entre os eletrodos, entre 400 e 1200 V e então se introduz o gás nitretante (que geralmente é uma mistura de N_2 - H_2) no reator até atingir a pressão de trabalho[10].

Nestas condições o plasma já está revestindo completamente o catodo e a peça a ser nitretada. Os íons deste plasma serão acelerados para a superfície do catodo onde diversos efeitos ocorrem, dentre eles o aquecimento da peça devido ao bombardeamento pelos íons. A temperatura da peça é então controlada pela corrente até o valor desejado. A partir daí é contado o tempo de duração do processo[10].

Após este tempo, a fonte é desligada e a peça é deixada resfriar naturalmente. O sucesso da nitretação iônica deve-se, além do caráter ecológico, às inúmeras vantagens da mesma sobre os processos convencionais. Elas podem ser sumarizadas como se segue [10]:

a) Baixa temperatura de tratamento: é possível realizar a nitretação a temperaturas reduzidas como 300° C. Dessa forma, evitam-se distorções dimensionais e não influência em outros tratamentos térmicos já realizados na amostra.

b) Controle da camada: através das variáveis do processo (tensão no eletrodos, pressão) pode-se obter um melhor controle da estrutura da camada.

c) Tempo de tratamento inferior: o tempo efetivo de tratamento é inferior aos processos convencionais (um tratamento convencional que dura de 40 a 60 horas pode ser realizado em 20 horas).

d) Nitretação de partes da peça: partes que não se pretende nitretar podem ser protegidas com materiais isolantes.

e) Possibilidade de desnitretação: a desnitretação é facilmente conseguida através de um tratamento em plasma utilizando apenas hidrogênio como atmosfera em fluxo contínuo. Através da formação de amônia, o nitrogênio vai sendo retirado da peça e sendo levado para fora do sistema.

f) Mais economia: o custo da energia e do gás é bem menor que nos processos convencionais (o rendimento de aquecimento a plasma chega até a 80%).

2.5.2 CEMENTAÇÃO A PLASMA

Cementação a plasma é um importante tratamento termoquímico na indústria do aço. No processo, a amostra a ser cementada é introduzida em um forno com atmosfera controlada. Então, carbono é depositado na superfície da peça devido a reações que ocorrem entre superfície e os gases que constituem a atmosfera. A figura 7 mostra o aparato utilizado no processo.

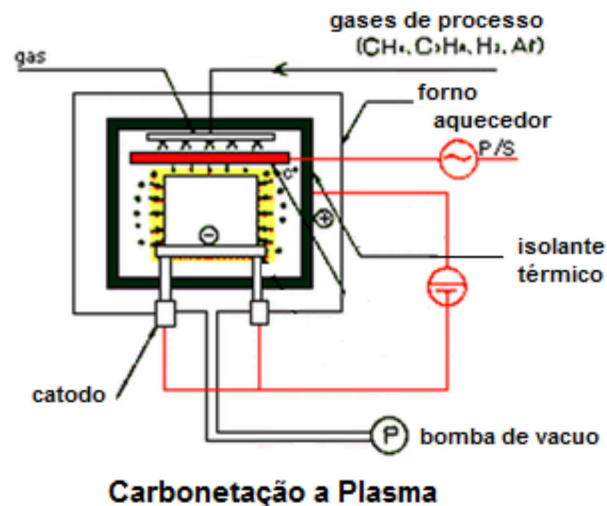


Figura 7- Aparato usado na cementação a plasma [12]

O carbono difunde no aço, criando uma camada dura de carbonetos. A espessura dessa camada depende da quantidade de carbono presente na superfície do material assim como do tempo e a temperatura nas quais foi realizado o processo. As camadas produzidas neste tipo de processo possuem melhores estruturas e propriedades. Além disso, não ocorre oxidação interna, e a camada apresenta melhor uniformidade e conseqüentemente provoca menor distorção do componente [12].

Outra vantagem deste processo, em relação à cementação líquida, gasosa e sólida, é o fácil controle da camada formada assim como a quantidade de carbono transferida à superfície. Quantidade esta que depende da densidade de corrente no plasma que pode ser monitorada e controlada. Apesar de possuir um limite de solubilidade menor do que o do nitrogênio na austenita, devido ao fato de possuir maior tamanho atômico, o carbono se difunde com maior facilidade. Assim, a cementação gera camadas mais espessas que a nitretação [3]. Conseqüentemente pode-se conseguir maior capacidade de suporte de carga.

Entretanto, a camada nitretada, mesmo sendo menos espessa, apresenta maior dureza. Tal fato pode ser explicado pela supersaturação. Apesar de carbono e nitrogênio ocuparem as mesmas posições intersticiais da rede, a supersaturação do carbono em solução sólida é muito menor, conseqüentemente, a expansão da rede (austenita expandida) é menor do que a de nitrogênio[10].

3 METODOLOGIA

3.1 SISTEMAS SUBMETIDOS AO ENSAIO

Visando avaliar e comparar o comportamento tribológico das amostras, cinco diferentes sistemas foram utilizados como descrito na tabela 2.

Tabela 2- Sistemas utilizados nos ensaios[3]

<u>Sistema</u>	<u>Designação</u>
S0	Substrato (Aço inox AISI 316)
S1	Carbonetado a plasma
S2	Duplex carbonetado a plasma
S3	Carbonetado seguido por nitretação (Sequencial)
S4	Duplex Sequencial

Através de análises químicas do substrato de trabalhos anteriores [3] foi obtida a seguinte composição mostrada na tabela 3:

Tabela 3- Composição química percentual da amostra do substrato [3]

Composição das amostras - Aço Inoxidável AISI 316 (%)							
C	S	Mn	Mo	Cr	Ni	P	Si
0,022	0,025	1,53	2,66	17,13	12,76	0,031	0,389

Os tratamentos superficiais a plasma geraram uma camada cementada de 14µm no sistema S1, uma camada de 14,8 µm no sistema S2, sendo 13,1 µm gerados pela cementação e 1,7 µm devido ao recobrimento com (Cr,Al)N , uma camada de 8 µm no sistema S3 ,sendo 2 µm de gerado pela nitretação e 6µm pela cementação, e uma camada de 9,9 µm no sistema S4 ,sendo 7,9 µm pelo tratamento sequencial e 2 µm do recobrimento de (Cr,Al)N.

As tabelas 4 e 5 possuem os resultados de testes de microdureza superficial Vickers e Knoop realizados nas amostras em trabalhos anteriores:

Tabela 4- Microdureza Vickers (HV) de todos os sistemas [3]

Força (N)	Substrato	Carbonetado	Duplex Carbonetado	Sequencial	Duplex Sequencial
9,8	168 ± 7	240 ± 3	289 ± 11	222 ± 5	256 ± 10
4,9	174 ± 9	286 ± 15	385 ± 29	242 ± 7	302 ± 14
2,94	171 ± 9	324 ± 9	514 ± 32	274 ± 18	391 ± 29
1,96	173 ± 11	383 ± 22	545 ± 27	309 ± 16	450 ± 34
0,98	172 ± 11	484 ± 54	766 ± 72	369 ± 31	641 ± 59
0,49	170 ± 10	600 ± 77	1056 ± 62	521 ± 58	1008 ± 88
0,245	163 ± 10	755 ± 57	1287 ± 252	665 ± 60	1411 ± 114
0,098	155 ± 11	800 ± 132	-	864 ± 96	-

Tabela 5- Microdureza Knoop (HK) de todos os sistemas [3]

Força (N)	Substrato	Carbonetado	Duplex Carbonetado	Sequencial	Duplex Sequencial
9,8	235 ± 14	422 ± 17	587 ± 30	359 ± 17	460 ± 15
4,9	187 ± 11	530 ± 28	620 ± 20	325 ± 11	443 ± 26
2,94	186 ± 13	714 ± 64	877 ± 48	405 ± 22	581 ± 39
1,96	183 ± 6	729 ± 99	1198 ± 80	443 ± 37	793 ± 50
0,98	188 ± 13	1020 ± 76	2116 ± 191	644 ± 44	1623 ± 215
0,49	192 ± 15	1250 ± 161	5068 ± 748	922 ± 100	2943 ± 215
0,245	199 ± 19	1373 ± 178	-	1340 ± 155	3526 ± 871
0,098	189 ± 12	1393 ± 144	-	1610 ± 179	-

3.2 ENSAIOS DE RISCAMENTO

Durante os ensaios de riscamento realizados, a seguinte norma foi utilizada para a determinação dos parâmetros de teste e execução do mesmo: “*Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus*” [9] estabelecida e revisada em 2009 pela ASTM Internacional (*American Society for Testing and Materials*).

Para a realização dos ensaios de riscamento foi utilizada uma máquina do tipo *UMT Multi-Specimen Test System* da CETR (figura 8) que pertence ao Laboratório de Caracterização de Superfícies de Materiais (LCSM) do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

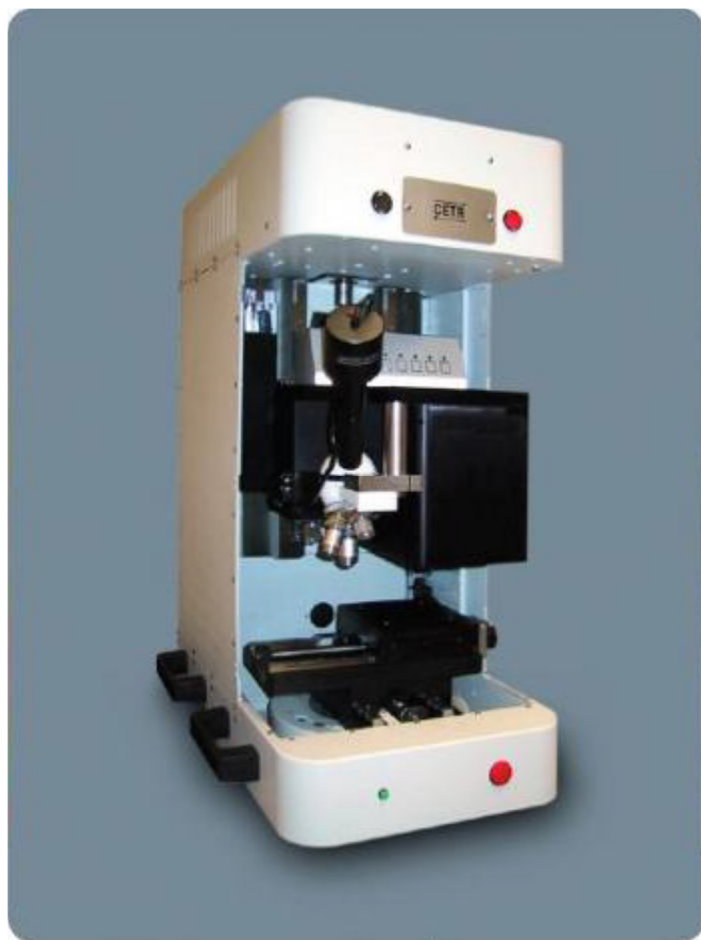


Figura 8- Equipamento utilizado para realizar o ensaio de riscamento

Tendo como referência a norma do Handbook da ASM[5], definiram-se os parâmetros dos ensaios.

Foram utilizadas três cargas normais nos testes, 2, 10 e 19 Newtons, e em cada amostra foram realizados três riscos de cada força normal. Todas amostras foram submetidas às mesmas condições de teste. Essas condições estão especificadas na tabela 6.

Tabela 6- Parâmetros utilizados nos ensaios de riscamento

Carga Normal (N)	2,10 e 19
Velocidade	2 mm/s
Comprimento do risco	5 mm
Temperatura	20 °C
Umidade relativa	60%

Nos ensaios foi utilizado um indentador de diamante (tipo *Rockwell C*) com ângulo e raio de ponta de 120° e 200 µm, respectivamente, como mostra a figura 9.

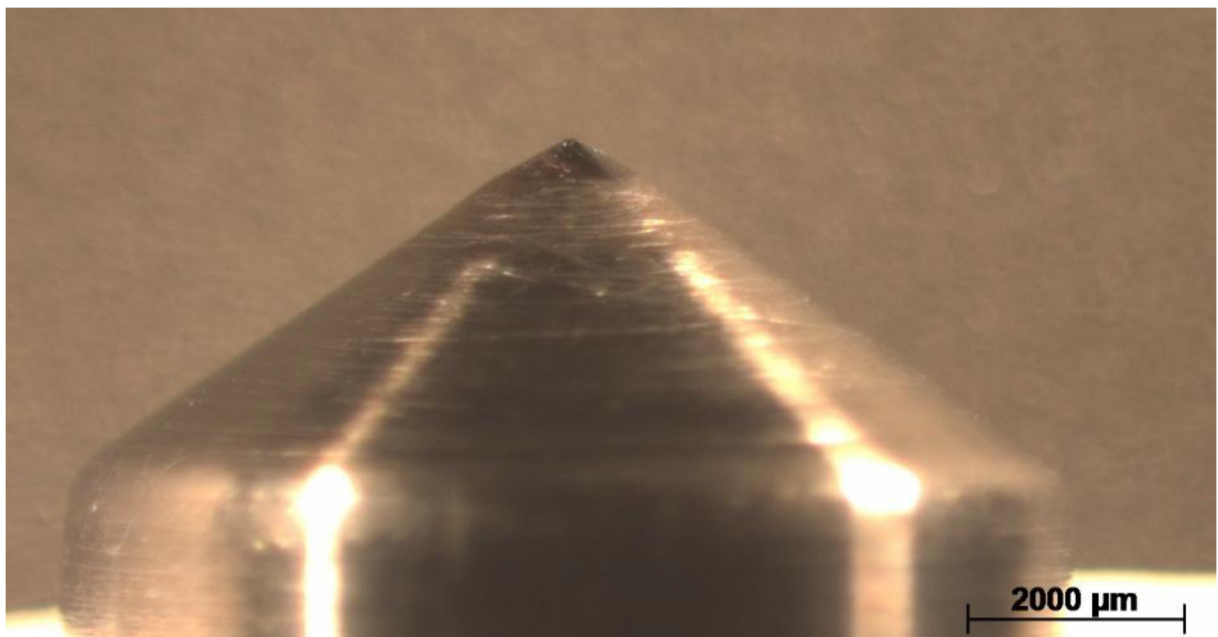


Figura 9- Detalhes do indentador de diamante

3.2.1 - MEDIDA DA LARGURA DO RISCO

Após cada ensaio de riscamento, foi necessário medir a largura do sulco formado para calcular o número de dureza ao risco da amostra. As larguras foram medidas com auxílio de imagens obtidas através de microscópios. Neste trabalho foram utilizados dois tipos de microscópios, um microscópio ótico e um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Para cada risco foram realizadas 3 medidas de largura. Lembrando que estas medidas foram obtidas em posições aproximadamente equidistantes. A figura 11 é uma foto de um risco obtida com auxílio do microscópio eletrônico de varredura e a figura 10 é a foto de um microscópio ótico, pode-se observar nas duas a maneira como foi obtida a largura dos riscos nos ensaios.

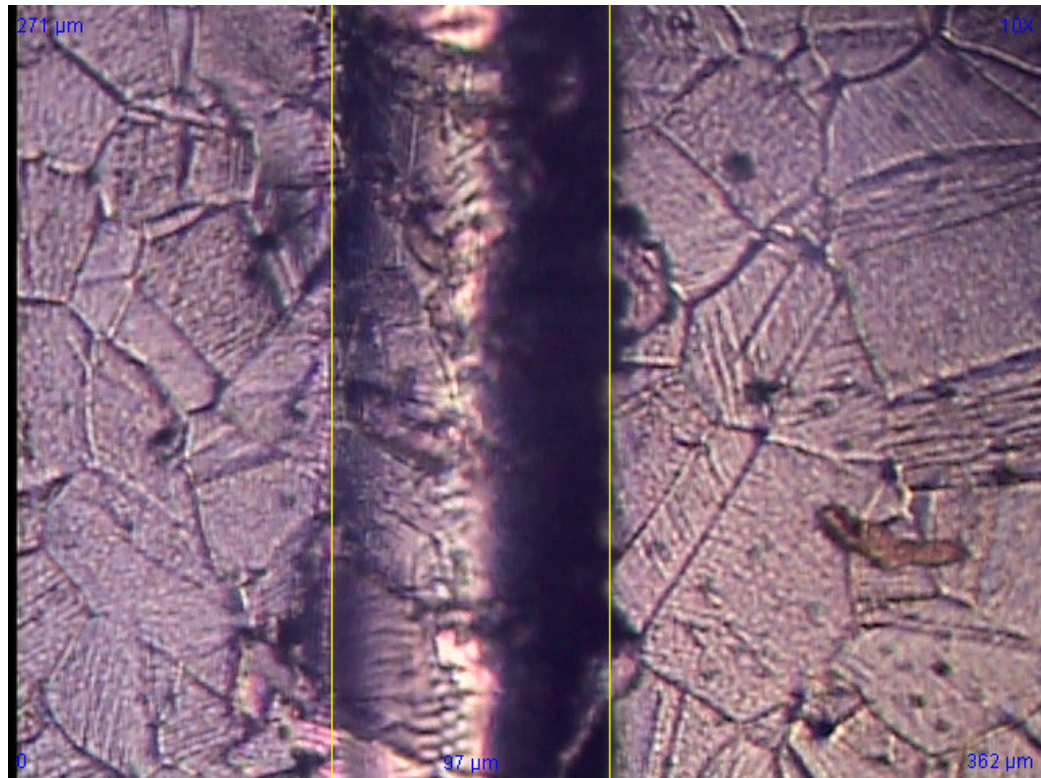


Figura 10 – Largura do risco de 10N na amostra S4 (microscópio ótico)

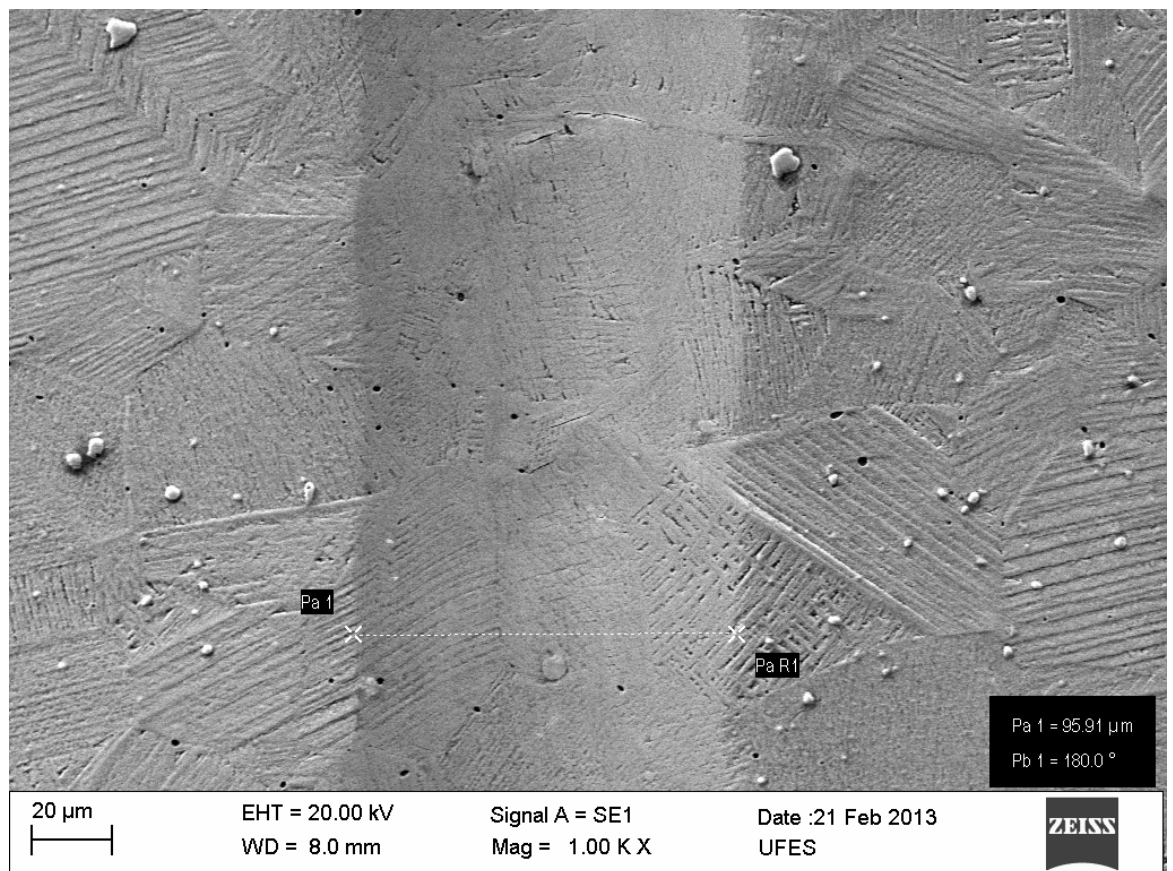


Figura 11 - Foto do Risco no MEV

Os riscos tinham 5 mm de comprimento, o padrão adotado foi: uma medida no meio, e uma a 1,5 mm de distância do início e do final do risco. De acordo com a seguinte figura:

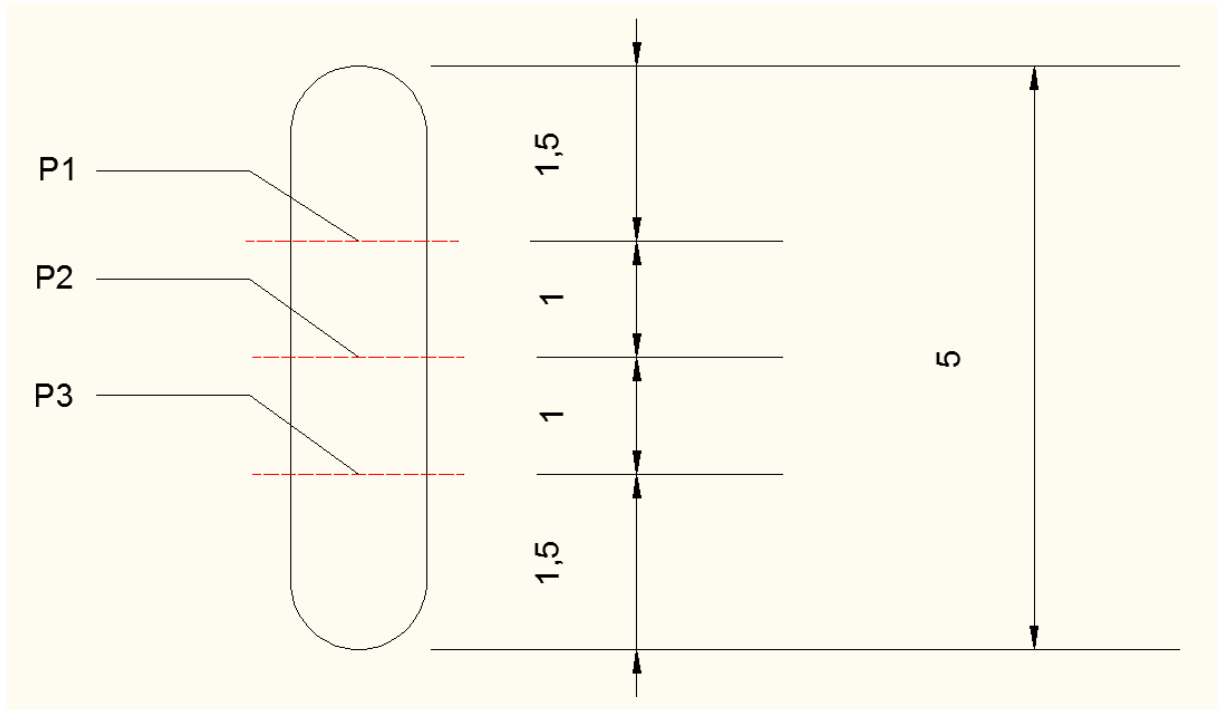


Figura 12 - Esquema de obtenção de largura

3.3 ANÁLISE TOPOGRÁFICA

Após serem realizados os ensaios de riscamento, as amostras foram levadas ao perfilômetro *TalySurf CLI – 3D Surface profiling Systems* do fabricante *Taylor Hobson Precision* (figura 13) que também pertence ao LCSM do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo. Através desta análise é possível uma melhor verificação e caracterização dos mecanismos de deformação presentes nas amostras.



Figura 13- Equipamento utilizado para realizar as análises topográficas das amostras

Todas as amostras foram submetidas à perfilometria 3D a fim de caracterizar todos os riscos realizados. Através desta caracterização foi possível fazer uma melhor análise dos riscos presentes, traçar o perfil do risco formado e visualizar se houve deslocamento e/ou remoção de material devido ao riscamento. Esta última análise foi realizada através da medição, feita pelo software *TalyMap Gold 4.1*, dos volumes de material deslocado e do sulco formado, como descrito na seção 2.2 deste trabalho.

O trabalho de Kobric *et al.* [13], propõe uma metodologia complementar a norma ASTM [9], utilizando perfilometria, de caracterização de superfícies submetidas ao ensaio de riscamento. Define-se uma região da amostra, chamada de Zona de interferência (*ZOI – Zone of Interference*), vide figura 14, que descreve uma faixa que engloba todos os picos e vales e permite uma análise mais detalhada da superfície submetida ao risco e uma caracterização completa da área de sulcamento. Esta zona foi estabelecida para distinguir dois riscos que possuem a mesma largura, mas que não necessariamente apresentam o mesmo perfil volumétrico.

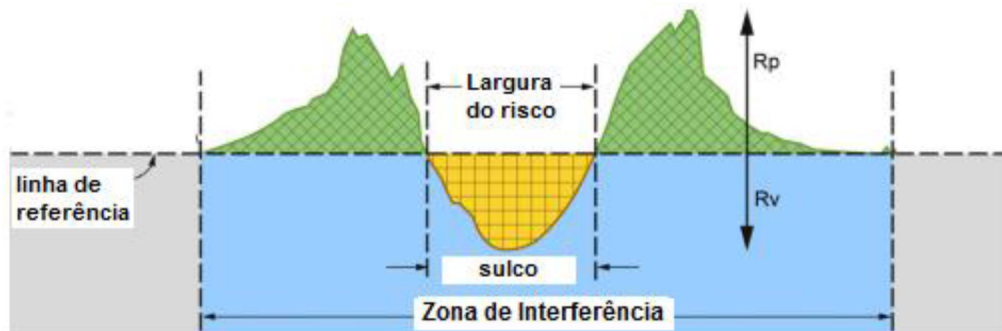


Figura 14- Perfil do risco com a definição da zona de interferência[13]

3.3.1 DETERMINAÇÃO DO PERFIL DO RISCO

Através do *TalyMap Gold 4.1* foi possível tratar os dados da perfilometria. Todas as amostras tiveram o mesmo tratamento, ou seja, foram tratadas com os mesmos parâmetros, sendo submetidas a um mesmo nivelamento, resolução, distorção, etc.

A determinação do perfil foi feita da seguinte forma:

- a)** Todos os perfis traçados ao longo do comprimento do risco foram sobrepostos, excluindo somente uma pequena parte nas extremidades do risco.
- b)** A partir dessa sobreposição definiu-se um perfil médio do risco.
- c)** Desse perfil médio foram medidas as áreas do sulco formado e de material deslocado.

A figura 15 mostra o exemplo para o caso do ensaio utilizando o substrato submetido a uma carga de 2N. A parte sombreada em cinza representa a sobreposição dos perfis dos riscos e a linha preta mostra o perfil médio dessa sobreposição.

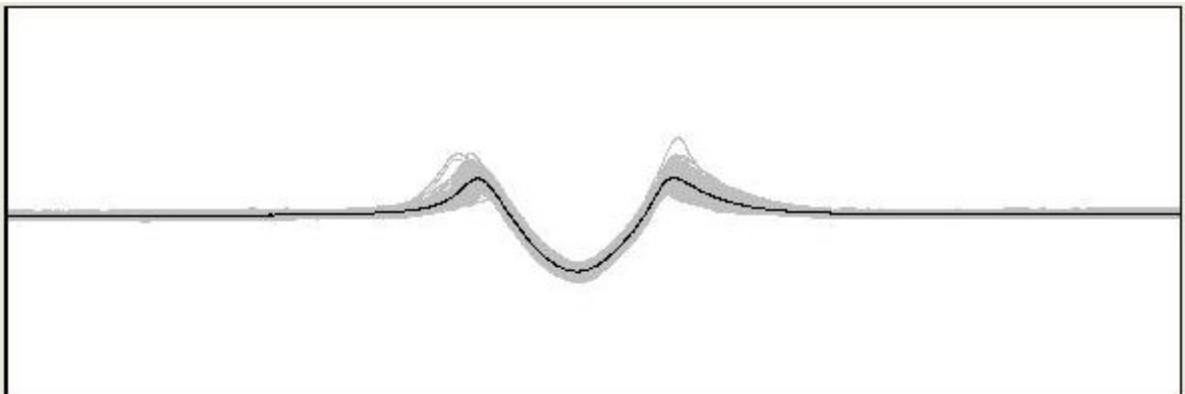


Figura 15 – Determinação do perfil médio dos riscos do substrato submetido a uma carga de 2N

A partir da definição do perfil médio descrito anteriormente, definiu-se as áreas do sulco e de material acumulado nas bordas do risco. Tais áreas estão representadas na figura 16.

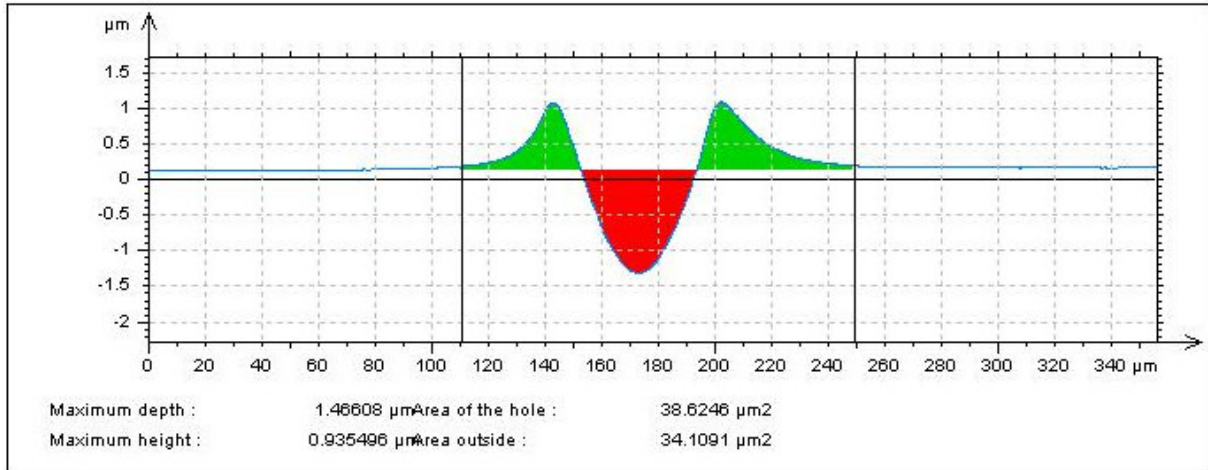


Figura 16- Determinação das áreas do sulco e de material acumulado nas bordas do risco a partir do perfil médio

A área em vermelho representa o sulco formado e a em verde, o material acumulado nas bordas do sulco.

A figura 17 mostra uma visão 3D do risco formado no substrato quando submetido a uma carga normal de 19N. Através desta figura percebe-se a região onde ocorreu acúmulo de material, região alaranjada, e no fundo do risco, uma região azulada.

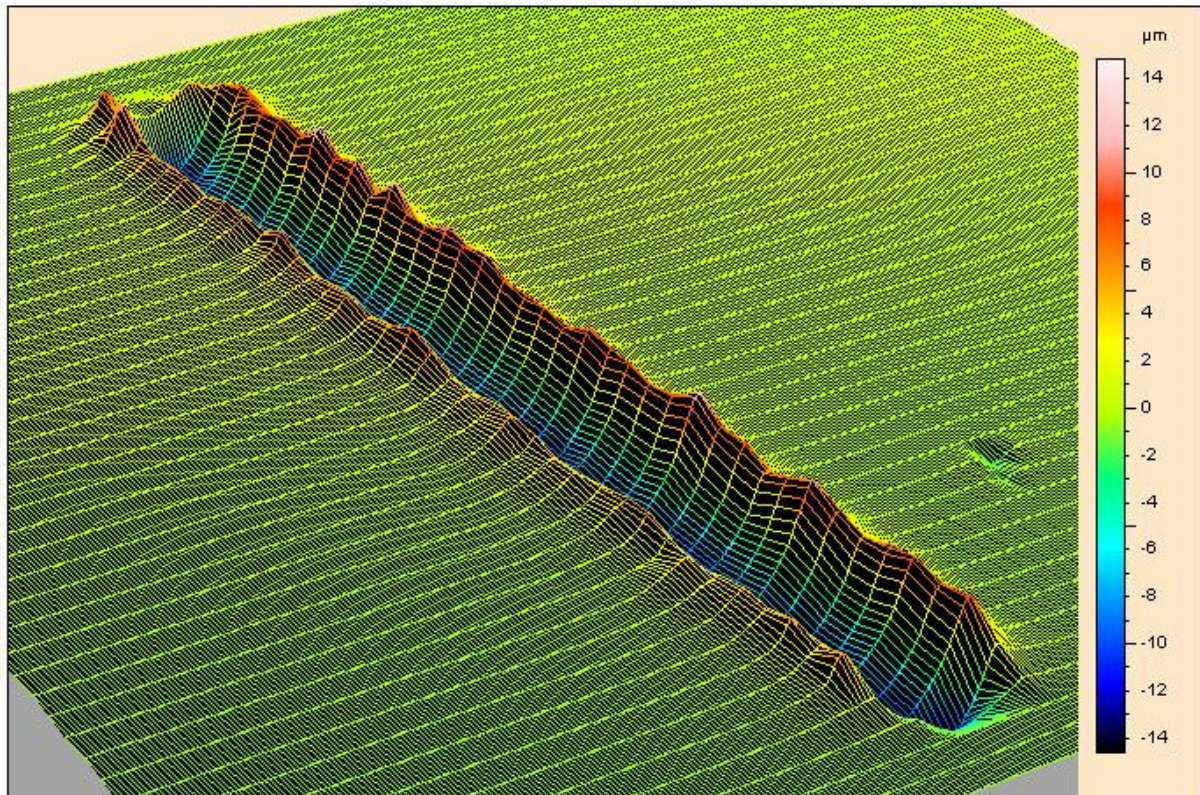


Figura 17– Visão 3D do risco da carga de 19N na amostra S0

Os valores das durezas aqui foram obtidos através da utilização da equação (2.3), com $K=24,98$ e efetuando as conversões de unidades necessárias.

Para obtenção da largura foram utilizados um microscópio ótico já contido na máquina de ensaios de Scratch Test e também através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao comparar as figuras 18 e 19 podemos observar que na figura 19 há a presença de trincas no risco. Houveram trincas nos riscos de 19N em todas as amostras revestidas. Na presença de trincas o resultado do ensaio pode sofrer mudanças na dureza..

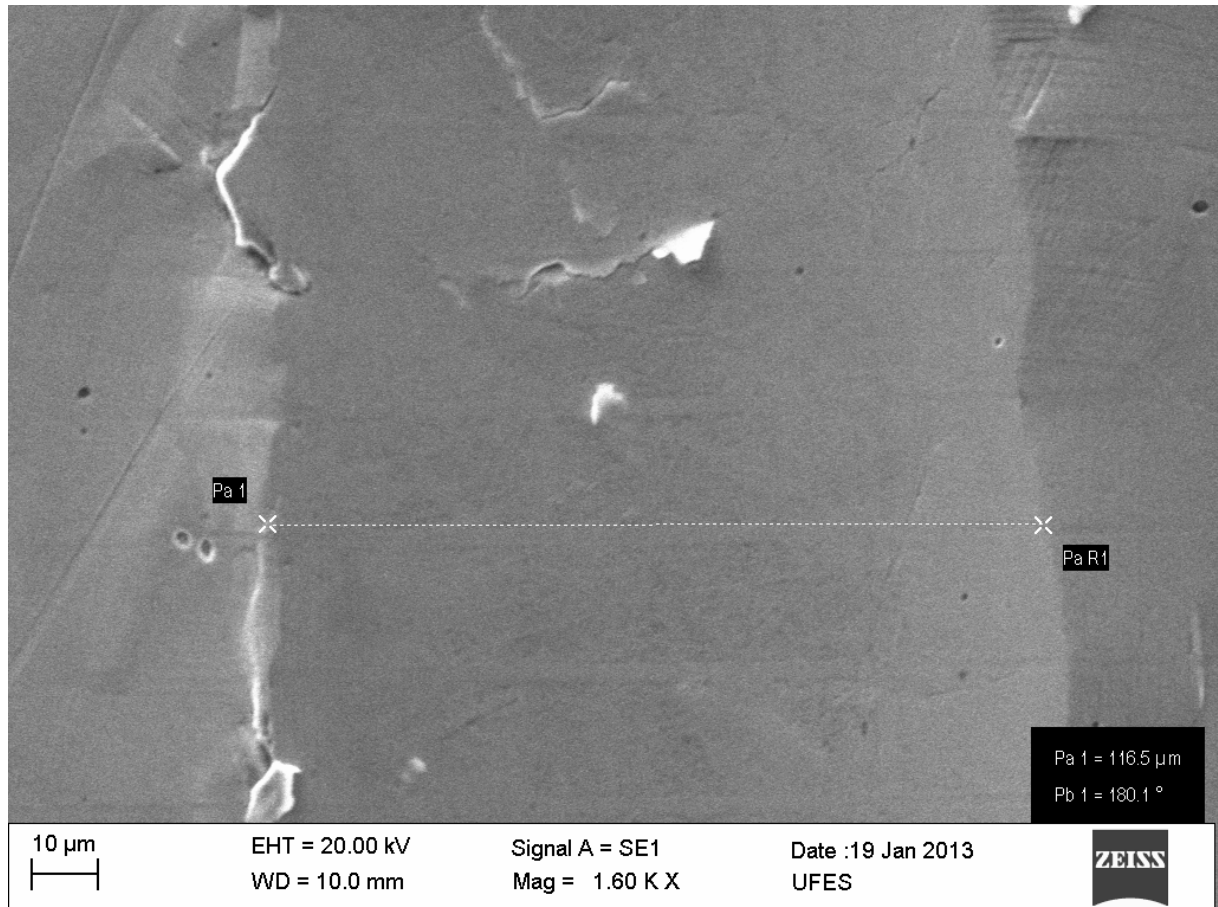


Figura 18- Largura do risco com força normal de 10N na amostra S0 (MEV)

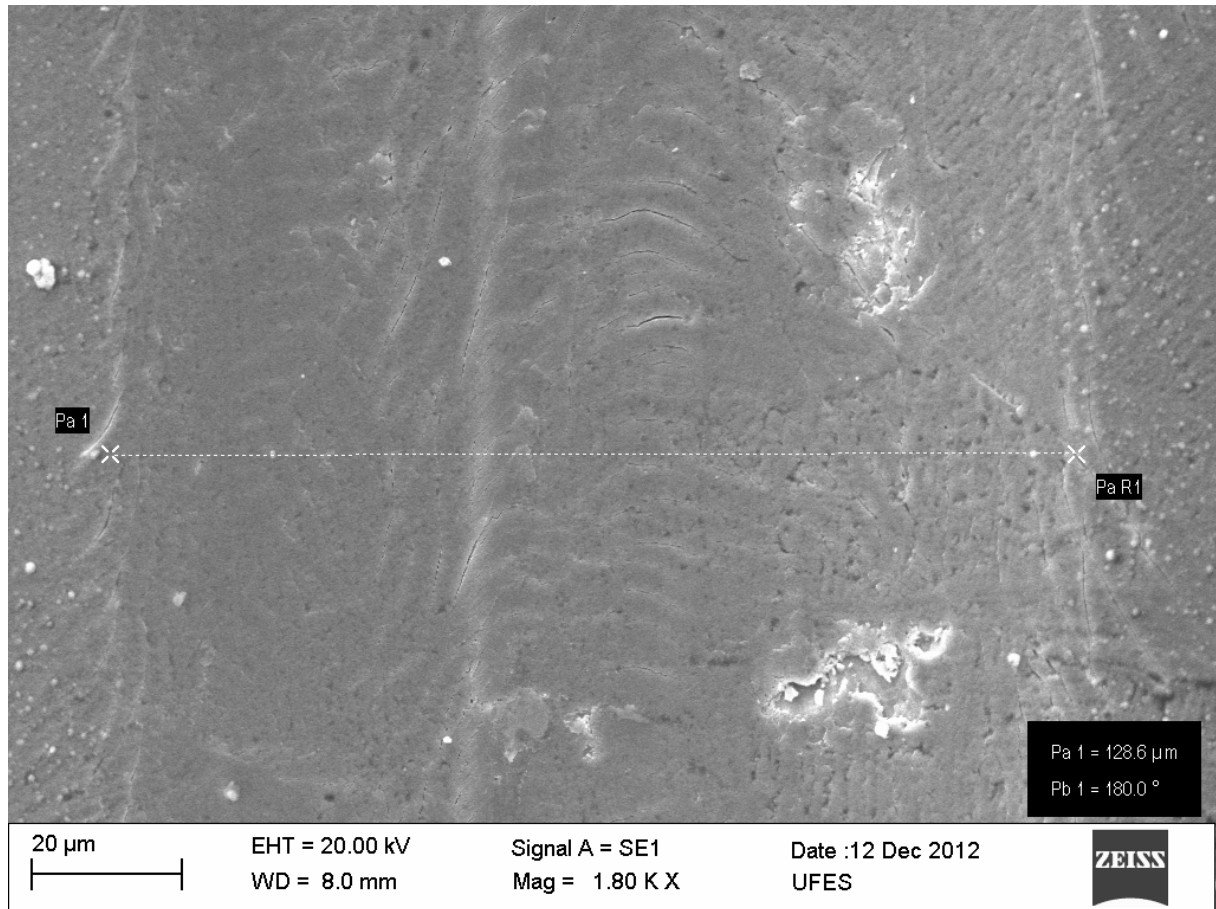


Figura 19- Risco obtido com força normal de 19 N na amostra S2

A tabela 7 e figura 20 contém os resultados obtidos com MEV e a tabela 8 e figura 21 contém os resultados obtidos com microscópio ótico:

Tabela 7- Dureza ao risco utilizando larguras obtidas através do MEV

Força (N)		2N	10N	19N
Dureza ao Risco (GPa)	S0	1,64±0,20	1,85±0,10	2,07±0,23
	S1	3,21±0,71	2,81±0,11	3,17±0,18
	S2	5,58±3,11	3,18±0,19	3,29±0,24
	S3	3,26±0,41	2,70±0,18	2,61±0,29
	S4	3,99±0,82	2,76±0,44	3,01±0,30

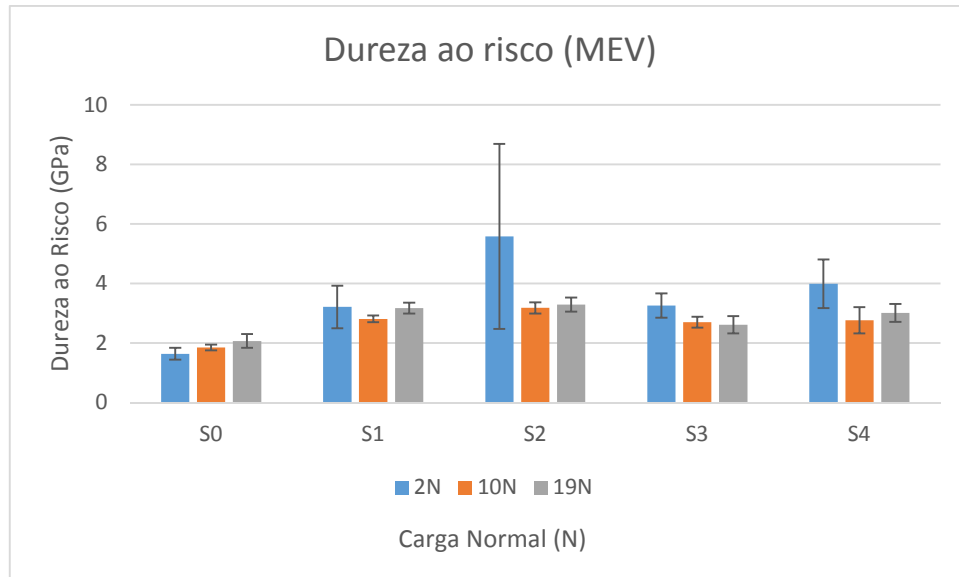


Figura 20- Dureza ao risco (MEV)

Tabela 8- Dureza ao risco utilizando larguras obtidas através do Microscópio ótico

Força (N)		2N	10N	19N
Dureza ao Risco (GPa)	S0	1,52±0,15	1,78±0,17	1,81±0,27
	S1	3,63±0,91	2,66±0,16	2,88±0,23
	S2	3,80±0,25	2,79±0,14	2,75±0,14
	S3	2,55±0,28	2,34±0,16	2,48±0,17
	S4	3,04±0,21	2,46±0,24	2,56±0,12

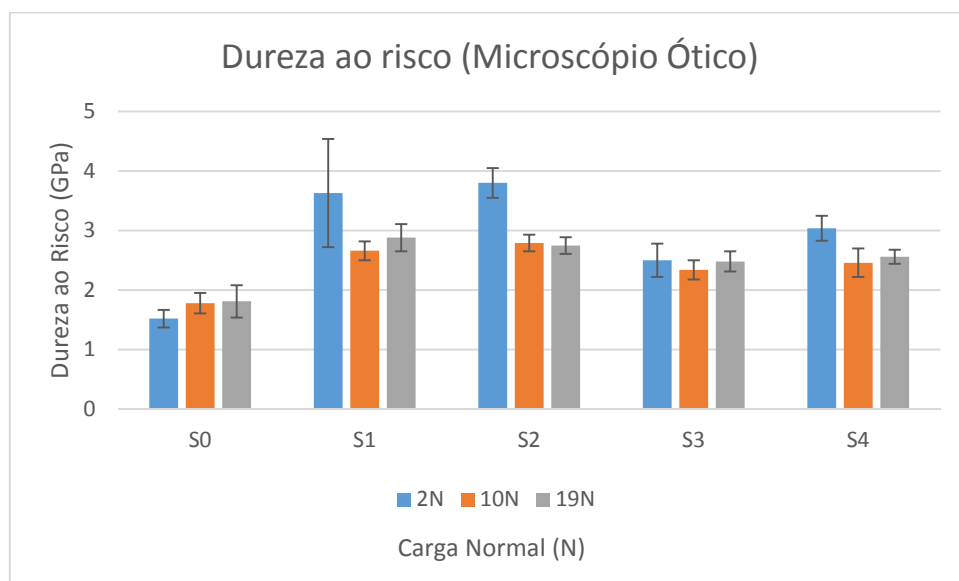


Figura 21- Dureza ao risco (Microscópio Ótico)

Segundo os resultados de dureza ao risco, as amostras tratadas apresentaram maior dureza em relação ao substrato S0, os desvios padrões dos resultados de dureza ao risco das amostras S1, S2, S3 e S4 se interceptam, de maneira que devido à incerteza envolvida, a dureza o risco das amostras tratadas pode ser considerada igual.

Através da utilização do equipamento TalySurf CLI 1000 que caracterizou a superfície dos riscos, foi possível estabelecer a relação das áreas f_{ab} , que permitiu estimar os micromecanismos de desgaste.

Abaixo na figura 22, temos a superfície de uma amostra obtida através do perfilômetro, ela foi utilizada para a obtenção de f_{ab} .

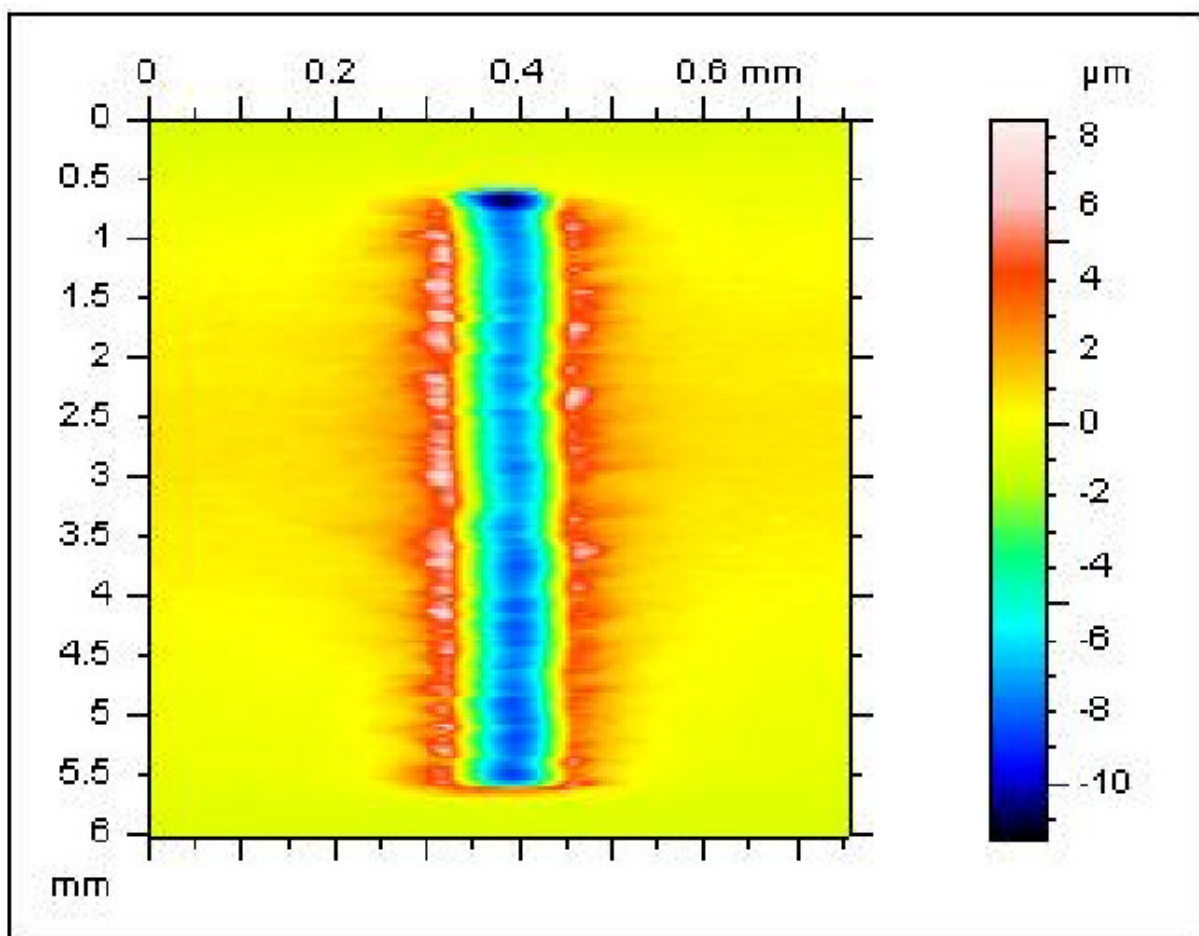


Figura 22- Perfil da superfície obtida após utilização do perfilômetro

Utilizando-se a região central do risco (eliminando 1 mm do início e do fim do risco) foi obtido um perfil médio, com esse perfil médio as áreas foram obtidas e então foi calculado f_{ab} . A seguir a figura 23 representa como as áreas foram obtidas com o perfil médio.

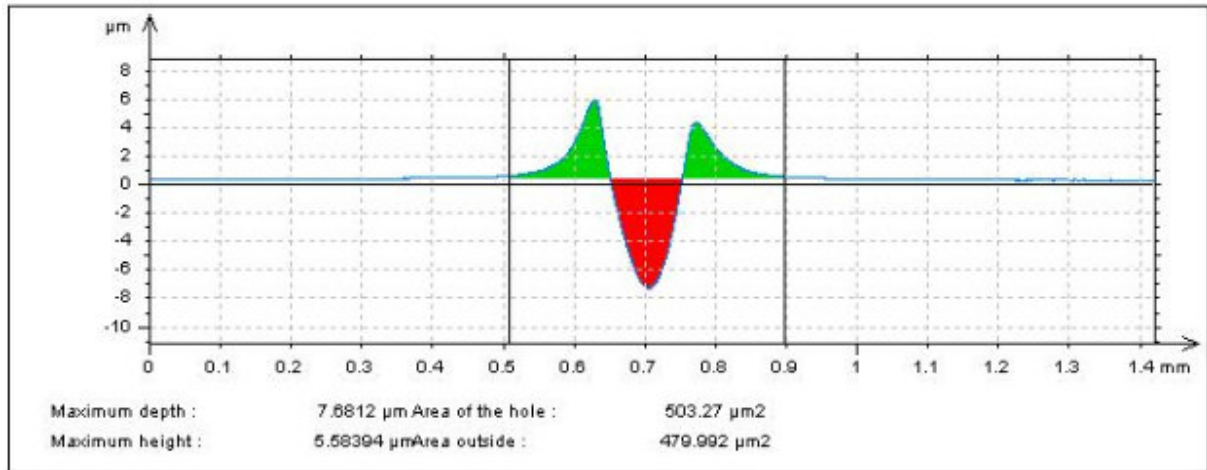


Figura 23- Esquema da obtenção da relação f_{ab} na amostra S3 (risco de 19N)

Os resultados de f_{ab} obtidos estão na tabela 9 e na figura 24 a seguir.

Tabela 9- Fator de Relação das áreas removidas e deformadas f_{ab}

Força (N)		2N	10N	19N
f_{ab}	S0	0,010 $\pm$ 0,035	0,047 $\pm$ 0,022	0,057 $\pm$ 0,025
	S1	0,326 $\pm$ 0,106	0,141 $\pm$ 0,022	0,165 $\pm$ 0,036
	S2	0,702 $\pm$ 0,042	0,247 $\pm$ 0,011	0,194 $\pm$ 0,072
	S3	0,189 $\pm$ 0,106	0,086 $\pm$ 0,073	0,146 $\pm$ 0,087
	S4	0,371 $\pm$ 0,060	0,369 $\pm$ 0,004	0,572 $\pm$ 0,013

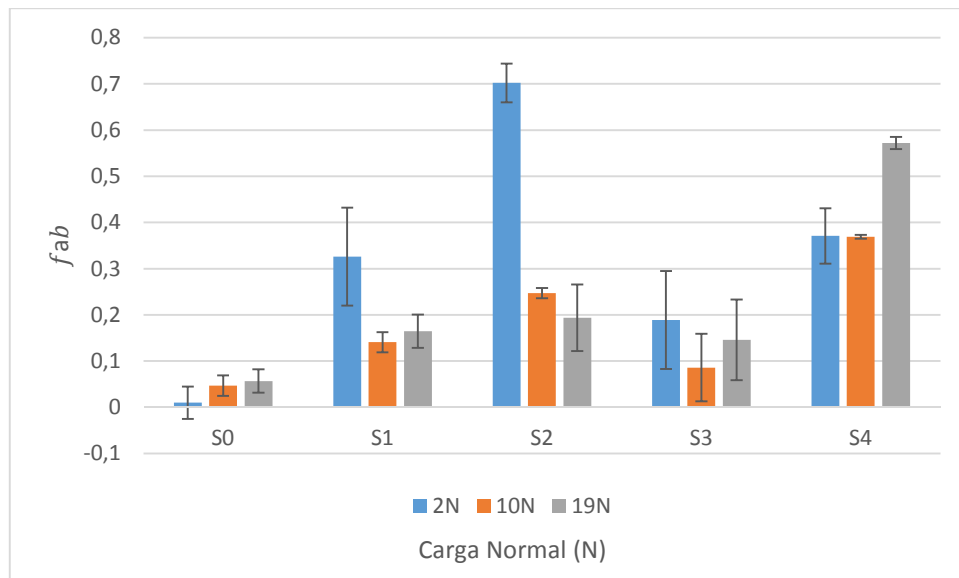


Figura 24- Relação das áreas removidas e deformadas f_{ab}

Percebe-se que com exceção do risco de 19 N na amostra S4 e o de 2N na amostra S2, os riscos apresentaram predominantemente deformação plástica (microsulcamento) e não remoção de material (microcorte).

Um coeficiente de arraste foi estabelecido no trabalho, que é a relação da força horizontal de resistência do deslocamento do risco com a força vertical imposta pelo indentador de diamante. Os resultados estão listados a seguir na tabela 10 e representados no gráfico da figura 25.

Tabela 10– Coeficiente de arraste F_x/F_z

Força (N)		2N	10N	19N
Coeficiente De Arraste	S0	$0,0129 \pm 0,0081$	$0,0026 \pm 0,0002$	$0,0097 \pm 0,0040$
	S1	$0,0091 \pm 0,0034$	$0,0099 \pm 0,0051$	$0,0036 \pm 0,0020$
	S2	$0,0161 \pm 0,0020$	$0,0095 \pm 0,0064$	$0,0102 \pm 0,0031$
	S3	$0,0220 \pm 0,0049$	$0,0068 \pm 0,0033$	$0,0076 \pm 0,0022$
	S4	$0,0105 \pm 0,0079$	$0,0136 \pm 0,0066$	$0,0113 \pm 0,0033$

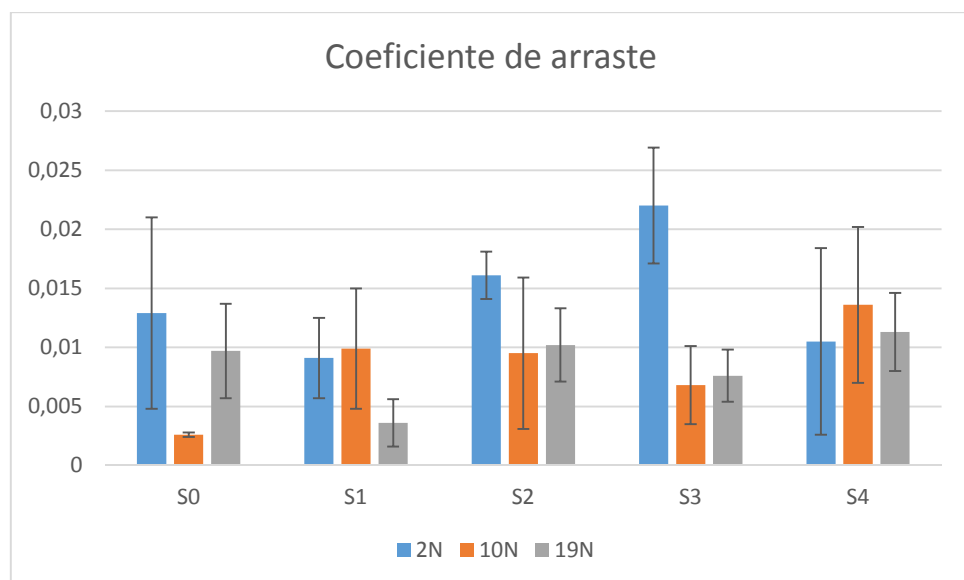


Figura 25- Coeficiente de arraste

Os desvios padrões se interceptam para os valores de coeficiente de arraste obtidos durante os ensaios. Sendo assim, os resultados foram iguais para as amostras.

5 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos pode-se concluir que os revestimentos apresentaram maior dureza ao risco em relação ao substrato. Entretanto todas amostras tratadas (S1, S2, S3 e S4) tiveram os desvios padrões dos resultados se interceptando, portanto apresentaram resultados iguais. Levando em conta apenas a dureza ao risco, a amostras S1 (Carbonetada a plasma) é a mais recomendada por ter passado apenas pelo tratamento de carbonetação, sendo necessário menos tempo e recursos para a preparação de S1, enquanto as outras passaram por tratamentos complementares de nitretação e/ou posterior deposição do recobrimento de (Cr,Al)N.

Houve predominantemente microssulcamento nos ensaios (deformação plástica), isso foi comprovado pelo cálculo de f_{ab} .

Os desvios padrões dos resultados do coeficiente de arraste se interceptam. Logo o coeficiente de arraste pode ser considerado igual nas amostras utilizadas.

Com o trabalho percebeu-se as imprecisões que podem ser geradas na medida da largura do risco, que em alguns casos como nos riscos de 2 newtons em que mesmo com o auxílio de um microscópio eletrônico houve dificuldade na determinação de algumas larguras. Para esses casos o mais recomendado seria utilizar o perfilômetro para obtenção mais precisa da largura do risco.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A obtenção das larguras dos riscos feitos com força vertical de dois Newtons pode ser feita usando um outro método, como o perfilômetro por exemplo, para reduzir os erros de medição.

Analisar a presença de trincas nos riscos e verificar a validade dos ensaios.

Utilizar cargas maiores do que as empregadas nesse trabalho ou realizar outro tipo de ensaio com carga variável ou riscos de múltiplos passes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CALLISTER, WILLIAM D. JR. (2000). **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC.
- [2] GENTIL, Vicente (1996). **Corrosão**
- [3] OLIVEIRA JR, R. B. (2011). **Avaliação do Efeito de Modificações Superficiais a Plasma no Desempenho do Aço AISI 316 Frente ao Desgaste e Corrosão**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG
- [4] R. de Faria, Pedro (2012). **Avaliação do comportamento mecânico-tribológico do Aço Inoxidável AISI 316 submetido a tratamentos superficiais a plasma através de ensaios de riscamento**. Projeto de graduação, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES.
- [5] **ASM Handbook; Mechanical Testing and Evaluation** (1996). 2.ed. Ohio: ASM International. Vol.8, pp. 676-2235.
- [6] WILLIAMS, S.R. (1942) **Hardness and Hardness Measurements**. American Society for Metals.
- [7] M F Stroud and H Wilman (1962). **The proportion of the groove volume removed as wear in abrasion of metals**
- [8] ZUM GAHR, K.H. (1987). **Microstructure and Wear of Materials** (1987). Institute of Materials Technology, University of Siegen - Germany. Elsevier Science Publishers B.V. pp 132- 167.
- [9] **Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus1**, ASTM International, designação: G171-03, reprovado em 2009
- [10] ALVES JR, C. **Nitreção a Plasma – Fundamentos e Aplicações**. Apostila.
- [11] COMINELI, O. G. (2010). **Fundamentos Tecnológicos da Fabricação do Aço**. Departamento de Engenharia Mecânica – UFES
- [12] **Plasma Carburising**. [Acessado em: 25 de Fevereiro de 2015] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=862>
- [13] KOBRIC, R. L.; KLAUS, D. M.; STREET JR, K. W. (2011). **Validation of proposed metrics for two-body abrasion scratch test analysis standards**. Wear. Elsevier.