

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

**PEDRO ROSSETO DE FARIA**

**Avaliação do comportamento mecânico-tribológico do Aço  
Inoxidável AISI 316 submetido a tratamentos superficiais a plasma  
através de ensaios de riscamento**

VITÓRIA

2012

**PEDRO ROSSETO DE FARIA**

**Avaliação do comportamento mecânico-tribológico do Aço  
Inoxidável AISI 316 submetido a tratamentos superficiais a plasma  
através de ensaios de riscamento**

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

2012

FARIA, Pedro Rosseto.

Avaliação do comportamento mecânico-tribológico do Aço Inoxidável AISI 316 submetido a tratamentos superficiais a plasma através de ensaios de riscamento / Pedro Rosseto de Faria – 2012.

73f.

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. Mecanismos de deformação I. FARIA, Pedro Rosseto. II. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica. III. Avaliação do comportamento mecânico-tribológico do Aço Inoxidável AISI 316 submetido a tratamentos superficiais a plasma através de ensaios de riscamento.

**PEDRO ROSSETO DE FARIA**

**Avaliação do comportamento mecânico-tribológico do Aço  
Inoxidável AISI 316 submetido a tratamentos superficiais a plasma  
através de ensaios de riscamento**

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 2012.

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Antônio Cesar Bozzi  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES  
Orientador

---

Prof. Dr. Flávio José da Silva  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES  
Examinador

---

Prof. Dr. Adonias Ribeiro Franco Júnior  
Instituto Federal Espírito Santo – IFES  
Examinador

*...dedico este trabalho aos meus pais,  
Gilberto e Regina, a minha irmã, Livia, e  
ao Paulinho...*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus em primeiro lugar, por ter me protegido e guiado durante toda essa caminhada e por ter me permitido chegar ao fim de mais um desafio.

A toda minha família, especialmente meus pais, Gilberto e Regina, por todo o sacrifício e confiança que me fizeram chegar até aqui.

Agradeço também ao meu Professor e Orientador, Dr. Antônio Cesar Bozzi, pela oportunidade, por todos os ensinamentos e por sua disponibilidade que foram de fundamental importância em meu aprendizado e no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Marcelo Camargo S. de Macêdo, chefe do Laboratório de Caracterização de Superfície de Materiais, pela disponibilidade e pelo acesso aos equipamentos utilizados ao longo deste estudo.

Ainda aos amigos e companheiros de curso, Leandro Falqueto, pela grande ajuda nas análises de topografia e Mateus Aguiar pelas discussões e conselhos a respeito do ensaio de riscamento.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma participaram desta etapa, mesmo que porventura, sequer notaram que contribuíram.

## RESUMO

Neste trabalho foi realizada uma avaliação do comportamento mecânico-tribológico do aço inoxidável AISI 316 submetido a tratamentos de cementação e/ou nitretação através de ensaios de riscamento (*Scratch Test*). A motivação veio do fato de que este tipo de material, apesar de apresentar elevada resistência à corrosão, não é recomendado para aplicações em que se exige elevada resistência ao desgaste, devido a sua baixa dureza. Entre as inúmeras propostas sugeridas para atender essa exigência estão os métodos de tratamentos termoquímicos a plasma. Três diferentes sistemas foram analisados, quais sejam: substrato de aço inoxidável AISI 316, substrato submetido à cementação e substrato submetido a tratamento sequencial de cementação e nitretação. Em cada uma dessas amostras foram realizados ensaios de riscamento sob mesmas condições, com valores crescentes de carga normal. Em seguida, caracterização topográfica foi realizada em todos os sistemas. Através de todos estes ensaios, a proposta de trabalho foi de realizar uma análise envolvendo as características mecânicas e tribológicas dos sistemas, como dureza ao risco, mecanismos de deformação e de desgaste, entre outros, e possíveis comparações entre os sistemas.

**Palavras-Chave:** Ensaio de Riscamento. Cementação e/ou nitretação. Perfilometria. Dureza ao risco. Mecanismos de deformação.

## ABSTRACT

In this work, a mechanical-tribological evaluation behavior of AISI 316 stainless steel was made. The stainless steel was subjected to carburizing and/or nitriding and tested by Scratch Test. The motivation of this study came from the fact that this type of material, despite having high corrosion resistance, isn't recommended for applications which requires high wear resistance due to low hardness. Among the many ideas suggested to meet this requirement, there are the methods of plasma thermochemical treatments. Three different systems were analyzed, which are: AISI 316 stainless steel substrate, the substrate subjected to carburizing and substrate subjected to sequential treatment of carburizing and nitriding. In each of these samples was performed scratch tests under the same conditions and each one were subjected to increasing values of normal load. Then, profilometry tests were performed on all systems. Through all these tests, the proposed work was to perform an analysis involving a mechanical and tribological characteristics of the systems as scratch hardness, deformation and wear mechanisms, among others, and possible comparisons between the systems.

**Keywords:** Scratch Test. Carburizing and/or nitriding. Profilometry. Scratch hardness. Deformation mechanisms.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Correlação entre escala Mohs e dureza a indentação [4] .....	15
Figura 2 - a) Risco de passe único, b) risco de múltiplos passes e c) risco em trajetórias circulares [4].....	16
Figura 3 - a) Configuração de pêndulo e b) com indentador na periferia de um disco girante [4].....	16
Figura 4 - Seção transversal do risco e a definição da fração <i>fab</i> [7].....	18
Figura 5 - a) Vista lateral do teste e b) vista superior [8] .....	23
Figura 6 - Esquema básico de um equipamento de nitretação a plasma [11] .....	26
Figura 7 - Aparato usado na cementação a plasma [12] .....	28
Figura 8 - Equipamento utilizado para realizar o ensaio de riscamento .....	31
Figura 9 - Detalhes do indentador de diamante.....	32
Figura 10 - Equipamento utilizado para realizar as análises topográficas das amostras.....	33
Figura 11 - Perfil do risco com a definição da zona de interferência [13] .....	34
Figura 12 - Sobreposição dos riscos e definição do perfil médio do risco .....	35
Figura 13 - Determinação das áreas do sulco e de material acumulado nas bordas do risco a partir do perfil médio .....	35
Figura 14 – Visão 3D do risco para o sistema cementado submetido a carga de 5N36	
Figura 15 - Primeira medida de largura feita no microscópio: 170 $\mu\text{m}$ , (S0 – 19N) ..	38
Figura 16 - Segunda medida de largura feita no microscópio: 175 $\mu\text{m}$ , (S0 – 19N) .	38
Figura 17 - Terceira medida de largura feita no microscópio: 174 $\mu\text{m}$ , (S0 – 19N) ..	39
Figura 18 - Durezas ao risco para todos os sistemas em função da carga .....	40
Figura 19 - Dureza convencional de todos os sistemas em função da carga aplicada .....	42
Figura 20 - Comparação entre dureza convencional e dureza ao risco .....	42
Figura 21 - Deformações e trincas causadas pelo ensaio de riscamento com aplicação de 19N. Respostas dos sistemas a) cementado e b) sequencial .....	43
Figura 22 - Resultados para uma aplicação de carga normal de 19N no substrato (S0).....	44
Figura 23 - Perfil médio do risco.....	45
Figura 24 - Determinação das áreas do sulco formado e de material deslocado .....	45
Figura 25 - Variação de <i>fab</i> com as cargas para todos os sistemas.....	47
Figura 26 - Profundidade do sulco formado em função da carga .....	48
Figura 27 – Medida da largura do sulco a partir do perfil médio (ex: S1 – 10N).....	49
Figure 28 – Dureza ao risco obtida com medições de largura realizadas durante a perfilometria.....	50
Figura 29 - Comparação entre durezas ao risco segundo o método utilizado na medição da largura.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição típica do aço inoxidável 316 [11].....	25
Tabela 2 - Sistemas utilizados nos ensaios.....	30
Tabela 3 - Composição química percentual da amostra do substrato [3].....	30
Tabela 4 - Parâmetros utilizados nos ensaios de riscamento.....	32
Tabela 5 - Dureza Média ao risco e seu desvio padrão para todos os sistemas.....	40
Tabela 6 - Dureza convencional de todos os sistemas. Adaptado de [2] .....	41
Tabela 7 - Resultados obtidos nas análises de perfilometria.....	46
Tabela 8 - Medidas das larguras feitas através das análises de perfilometria.....	49

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1 ENSAIOS DE RISCAMENTO.....	14
2.1.1 Contextualização histórica e origem do teste e a escala Mohs.....	14
2.1.2 Classificação dos ensaios quanto à velocidade .....	15
2.1.3 Parâmetros básicos do teste.....	16
2.2 ANÁLISE TOPOGRÁFICA DO RISCO .....	18
2.3 NORMA PADRÃO PARA DETERMINAR O NÚMERO DE DUREZA AO RISCO DE MATERIAIS UTILIZANDO INDENTADOR DE DIAMANTE .....	19
2.3.1 Sumário do teste .....	19
2.3.2 Significado e uso da norma.....	20
2.3.3 Equipamento .....	20
2.3.4 Procedimento .....	21
2.3.5 Definição dos termos específicos para a norma .....	22
2.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL .....	24
2.4.1 Aços Inoxidáveis .....	24
2.4.2 Aços inoxidáveis austeníticos .....	24
2.5 TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS .....	25
2.5.1 Nitretação a plasma .....	26
2.5.2 Cementação a Plasma.....	28
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>30</b>
3.1 SISTEMAS SUBMETIDOS AO ENSAIO.....	30
3.2 ENSAIOS DE RISCAMENTO.....	31
3.2.1 Medida da largura do risco.....	32
3.3 ANÁLISE TOPOGRÁFICA .....	33
3.3.1 Determinação do perfil do risco.....	34
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>37</b>
4.1 CÁLCULO DO NÚMERO DE DUREZA AO RISCO .....	37
4.1.1 Relação entre dureza convencional e dureza ao risco.....	41
4.2 ANÁLISE DE PERFILOMETRIA .....	44

4.2.1 Determinação da largura do risco através da perfilometria .....	48
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>6 SUGESTÕES .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Aços inoxidáveis austeníticos possuem uma excelente resistência à corrosão em diversos meios. Porém, sabe-se bem que esses aços apresentam baixo limite de escoamento e baixa resistência ao desgaste. Quando em contato com outros materiais ou consigo mesmo, eles apresentam uma acentuada deformação plástica superficial e desgaste metálico severo devido as fortes junções produzidas entre as superfícies em contato [1 e 2].

Esses aços são largamente usados como materiais resistentes à corrosão em vários setores da indústria de petróleo. No entanto, em aplicações em que também se exige uma alta resistência ao desgaste, como, por exemplo, em aplicações onde predomina o desgaste por abrasão, esses aços não são recomendados, devido principalmente à baixa dureza. Por esta razão, várias técnicas de engenharia de superfície têm sido desenvolvidas, dentre elas se destacam os processos de endurecimento superficial a plasma.

Assim, uma compreensão da resistência à abrasão e mecanismos de deformação associados é de fundamental importância para a engenharia de materiais e de projetos de muitos componentes quando sujeitos à abrasão. Com o objetivo de se avaliar e comparar o comportamento em abrasão dos materiais, vários ensaios podem ser realizados. Entre estes, temos o ensaio de riscamento.

Este ensaio, além do seu uso convencional e mais conhecido de avaliação da adesão de filmes finos a substratos, pode também ser utilizado para o estudo dos mecanismos de deformação e desgaste que ocorrem em filmes finos e materiais volumétricos submetidos a tensões normais e tangenciais combinadas. Dessa forma, contrasta com os ensaios de indentação, nos quais os danos nos materiais ocorrem com aplicação somente de tensões normais [3].

### 1.2 OBJETIVOS

Avaliar o comportamento mecânico-tribológico de amostras de aço inoxidável AISI 316 submetidas a tratamentos de nitretação e/ou cementação a plasma através de ensaios de riscamento em várias configurações, seguido por análises de topografia para melhor avaliar a resposta do material ao risco.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a base de estudos que foi realizada para tornar possível este trabalho. Partindo desde as primeiras observações de dureza, passando pelo meio de caracterização utilizado, o ensaio de riscamento, e chegando até a parte de caracterização topográfica do risco.

### 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:

- Determinar a dureza ao risco do material;
- Caracterizar os mecanismos de deformação e retirada de material;
- 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 no teste 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 [4].

#### 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 [5]. Ele mediu a dureza de uma substância como o ponto onde teve início o riscamento de uma barra cuja dureza decresceu de uma extremidade a outra.

Outro método similar foi usado por Werner, que desenvolveu a primeira escala real de dureza, a qual foi ainda mais explorada por Haury. Esta última continha quatro grupos de dureza listadas em ordem de suas mutuais capacidades de serem riscadas.

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.

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.

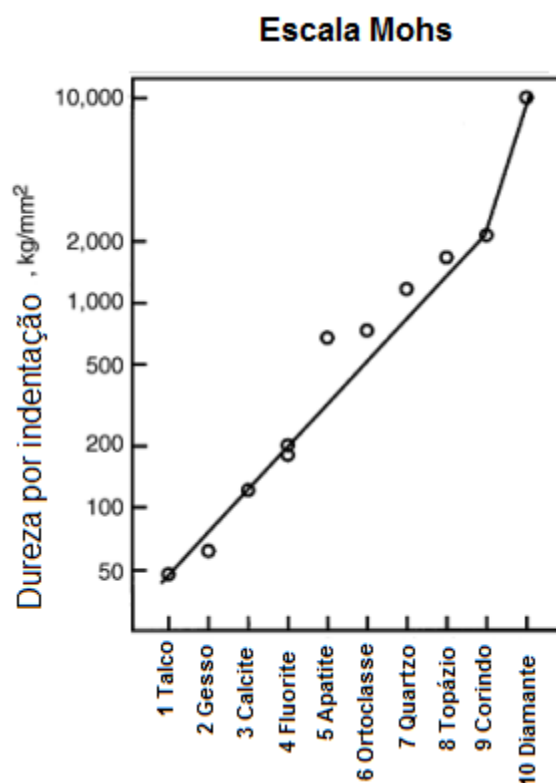


Figura 1 - Correlação entre escala Mohs e dureza a indentação [4]

A uniformidade desta escala em termos de dureza a indentação dos 10 minerais reflete a alta qualidade do trabalho experimental de Mohs.

### 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.

- I. 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.

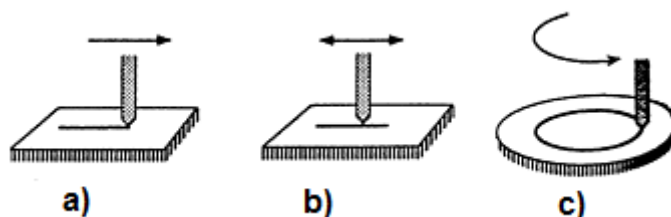


Figura 2 - a) Risco de passe único, b) risco de múltiplos passes e c) risco em trajetórias circulares [4]

- II. 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.

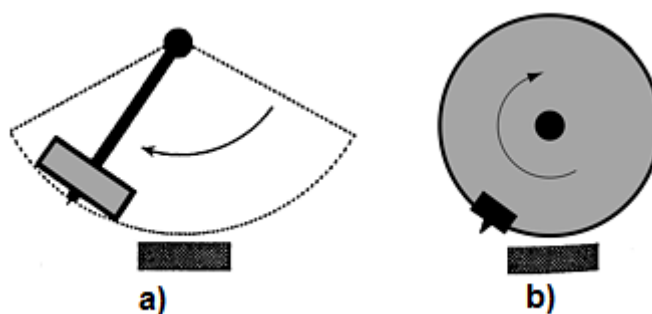


Figura 3 - a) Configuração de pêndulo e b) com indentador na periferia de um disco girante [4]

### 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:

- 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 [6], durante a abrasão de materiais macios, somente uma parte do volume do desgaste produzido por partículas abrasivas é removida em forma de detritos. 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 detrito de desgaste e o volume do sulco criado pode ser descrita pela fração  $f_{ab}$  [7]:

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

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  $f_{ab}$ .

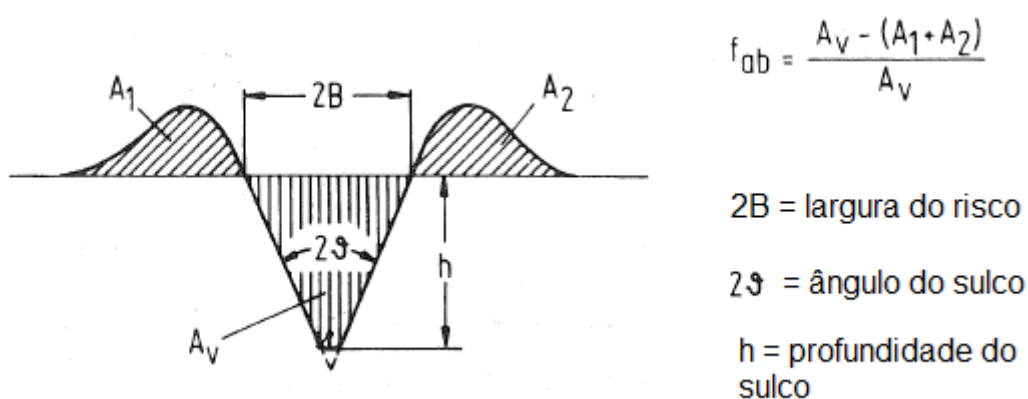


Figura 4 - Seção transversal do risco e a definição da fração  $f_{ab}$  [7]

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

- 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.
- Já o chamado Microtrincamento,  $f_{ab} > 1$ , só ocorre 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 [8] é usada para determinar os parâmetros necessários na determinação do número de dureza ao risco de materiais utilizando indentador de diamante.

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

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 resistência da superfície de teste a deformação pelo movimento tangencial do indentador.

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 (*spallation*), ou delaminação excessiva na superfície.

Casos de danos severos a superfície testada, assim como imprecisão na medição da largura do risco e casos em que a borda do risco esteja distorcida ou sofra perda de material na forma de cavaco (*chipped*) invalidam o teste.

### 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 quanto a ponta se desloca sobre a superfície e um meio de medir a largura do risco realizado.

- Indentador: este deve ser cônico, com ângulo de ponta de  $120 \pm 5^\circ$ , e o cone deve terminar de forma hemisférica com  $200 \mu m (\pm 10 \mu m)$  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 fricção.
- 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 para a norma

#### i. 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 expressão:

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

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:

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

Onde,

$HS_p$  = número de dureza ao risco                       $k$  = constante geométrica

$P$  = força normal aplicada                                       $w$  = largura do risco

A constante  $k$  pode ser obtida através de fatores de correção, com  $HS_p$  em GPa,  $P$  em grama-força, e  $w$  em  $\mu m$ . 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).

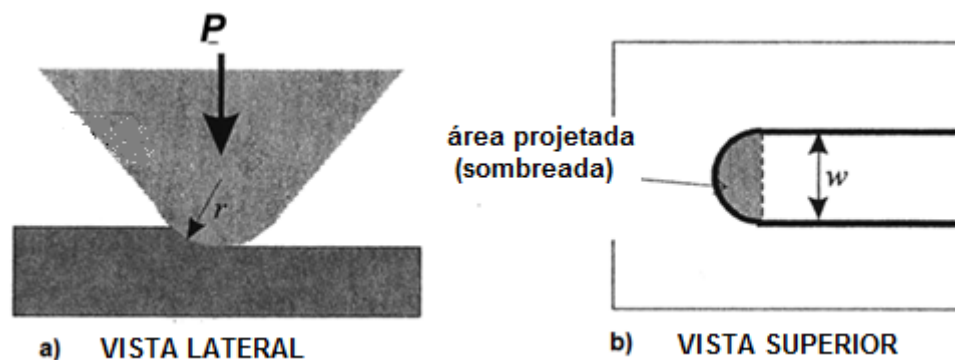


Figura 5 - a) Vista lateral do teste e b) vista superior [8]

Dessa forma chegamos a seguinte expressão para o cálculo do número de dureza ao risco:

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

ii. Força de riscamento (*Scratching force*)

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

iii. 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:

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

Onde,

$C_a$  = coeficiente de arraste do indentador

$F_r$  = força de riscamento

$P$  = força normal

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 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Tendo em vista facilitar a caracterização mecânico-tribológica que é objetivo deste trabalho, neste capítulo serão apresentados os aços inoxidáveis com ênfase na classe 316 que foi utilizada nos testes.

### 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.

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 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). 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 [9].

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

### 2.4.2 Aços inoxidáveis austeníticos

Nesta classe, o campo da fase austenita (ou fase  $\gamma$ ) 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 304. Como a classe padrão de rolamento de molibdênio, a liga de molibdênio fornece aço inoxidável 316 com propriedades resistentes à corrosão, e corrosão sob fresta de meios contaminados com cloro.

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. Embora seja considerado o tipo naval de aço inoxidável, o aço inoxidável 316 é também utilizado nas indústrias tais como automotiva, aeroespacial, construção, eletrônica e petroquímica. 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.

Tabela 1 - Composição típica do aço inoxidável 316 [11]

Tipo	(% em peso)					
	C (máx.)	Cr	Ni	Mn (máx.)	Si (Max)	Outros
<b>316</b>	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 e a fricção, 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.

## 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 e S3, 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. Porém, neste trabalho não será estudado este caso de tratamento dúplex.

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 [10]. 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 dútil e tenaz. Eles podem ser realizados de diversas maneiras, como: líquida, gasosa, sólida e a plasma.

### 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.

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.

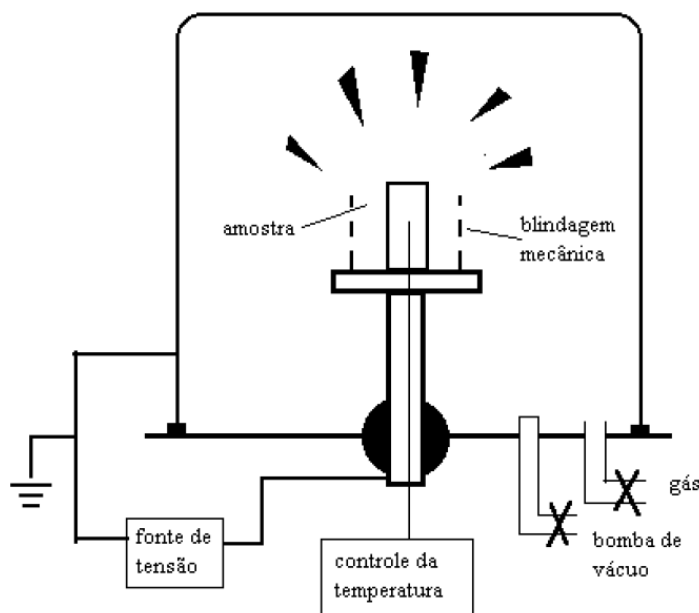


Figura 6 - Esquema básico de um equipamento de nitretação a plasma [11]

O sistema de vácuo deve ser capaz de atingir em torno de  $10^{-2}$  torr de pressão e os gases introduzidos para tratamento devem ser controlados por válvulas. A fonte de

potência possui uma saída DC 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.

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  $10^{-2}$  torr 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 (tipicamente uma mistura de  $N_2-H_2$ ) no reator até atingir a pressão de trabalho.

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.

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 [11]:

1. Baixa temperatura de tratamento: é possível realizar a nitretação a temperaturas reduzidas como 300° C. Dessa forma, evitam-se distorções dimensionais e não influencia em possíveis outros tratamentos térmicos já realizados na amostra.
2. Controle da camada: através das variáveis do processo pode-se obter um melhor controle da estrutura da camada.
3. Tempo de tratamento inferior: o tempo efetivo de tratamento é inferior aos processos convencionais.
4. Nitretação de partes da peça: partes que não se pretende nitretar podem ser protegidas com materiais isolantes.
5. 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.
6. Mais economia: o custo da energia e do gás é bem menor que nos processos convencionais.

### 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.

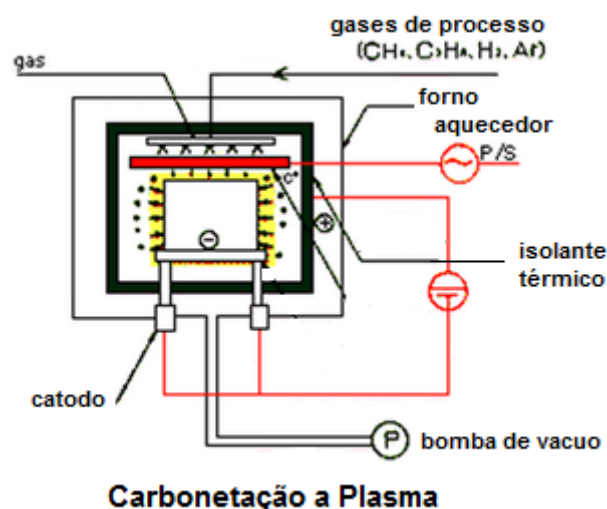


Figura 7 - Aparato usado na cementação a plasma [12]

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.

### 3 METODOLOGIA

Após as discussões anteriores que foram de suma importância para o entendimento do tema e para definições dos parâmetros a serem adotados nos testes, este capítulo tem o objetivo de relatar toda a metodologia utilizada tanto no ensaio de riscamento, como na caracterização topográfica, além do aparato experimental utilizado.

#### 3.1 SISTEMAS SUBMETIDOS AO ENSAIO

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

Tabela 2 - Sistemas utilizados nos ensaios

Sistema	Designação	Composição
<b>S0</b>	Substrato	Aço inoxidável 316
<b>S1</b>	Cementado	Aço inoxidável 316 Cementado
<b>S3</b>	Cementado e Nitretado	Aço inoxidável 316 Nitretado e Cementado

Uma análise química do substrato revelou a seguinte composição mostrada na tabela 3:

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

Composição do 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 e uma camada de 8µm no sistema S3, sendo 2µm de gerado pela nitretação e 6µm pela cementação.

### 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*” [8] 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.

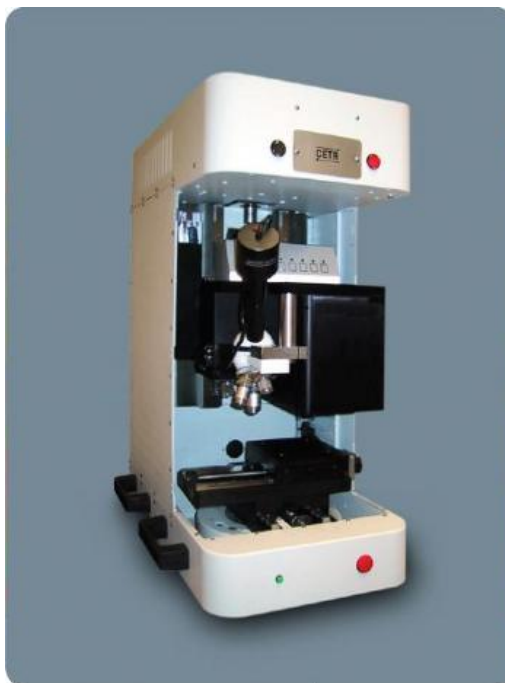


Figura 8 - Equipamento utilizado para realizar o ensaio de riscamento

Tendo como referência o estudo bibliográfico e a norma citada, definiram-se os parâmetros dos ensaios.

Tanto o substrato (S0) como as amostras que sofreram tratamento termoquímico de cementação e de nitretação mais cementação para formarem os sistemas S1 e S3, respectivamente, foram submetidas às mesmas condições de teste. Essas condições estão especificadas na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados nos ensaios de riscamento

Amostra	S0	S1	S3
Carga Normal (N)	2, 5, 10 e 19		
Velocidade (mm/s)	2		
Comprimento do risco (mm)	5		
Distancia entre riscos (mm)	2		
Temperatura (°C)	20		
Umidade Relativa	60%		

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

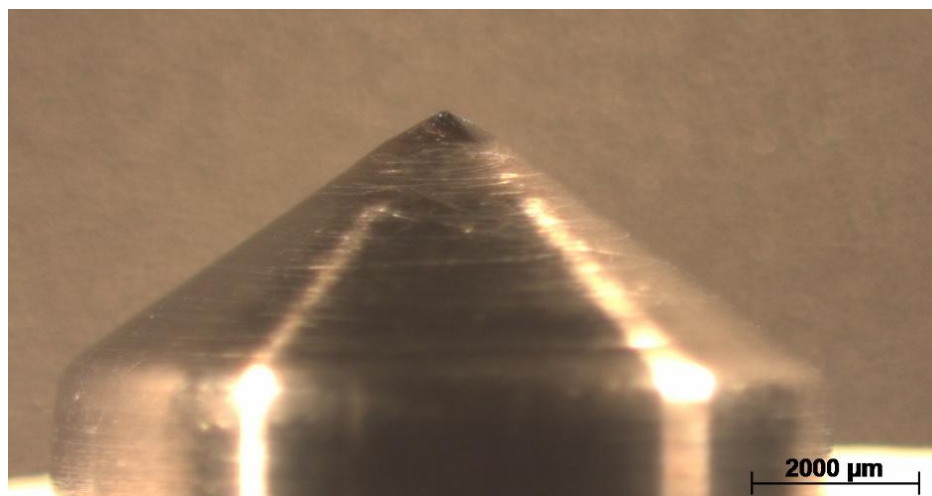


Figura 9 - Detalhes do indentador de diamante

### 3.2.1 Medida da largura do risco

Após cada ensaio de riscamento, é necessário medir a largura do sulco formado para calcular o número de dureza ao risco da amostra. Para isto, foi utilizado um microscópio ótico que fica acoplado a máquina CETR. Através dele, para cada risco foram feitas 3 medidas de largura. Lembrando que estas medidas foram feitas em posições aproximadamente equidistantes.

### 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 10) 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 10 - 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 é 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 é 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 [8], 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 11, 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 11 - 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 mesmo nivelamento, resolução, distorção, etc.

A determinação do perfil é feita da seguinte forma:

1. Todos os perfis traçados ao longo do comprimento do risco são sobrepostos, excluindo somente uma pequena parte nas extremidades do risco.
2. A partir dessa sobreposição define-se um perfil médio do risco.
3. Desse perfil médio são medidas as áreas do sulco formado e de material deslocado.

A figura 12 mostra o exemplo para o caso do ensaio utilizando sistema Cementado submetido a uma carga de 5N. A parte sombreada em cinza representa a sobreposição dos perfis dos riscos e a linha preta mostra o perfil médio dessa sobreposição.

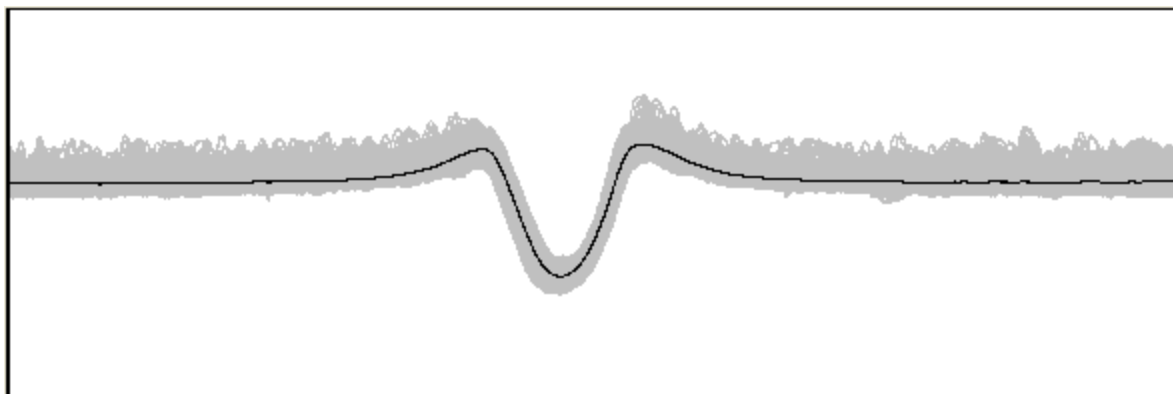


Figura 12 - Sobreposição dos riscos e definição do perfil médio do risco

A partir da definição do perfil médio descrito acima, definem-se as áreas do sulco e de material acumulado nas bordas do risco. Tais áreas estão representadas na figura 13.

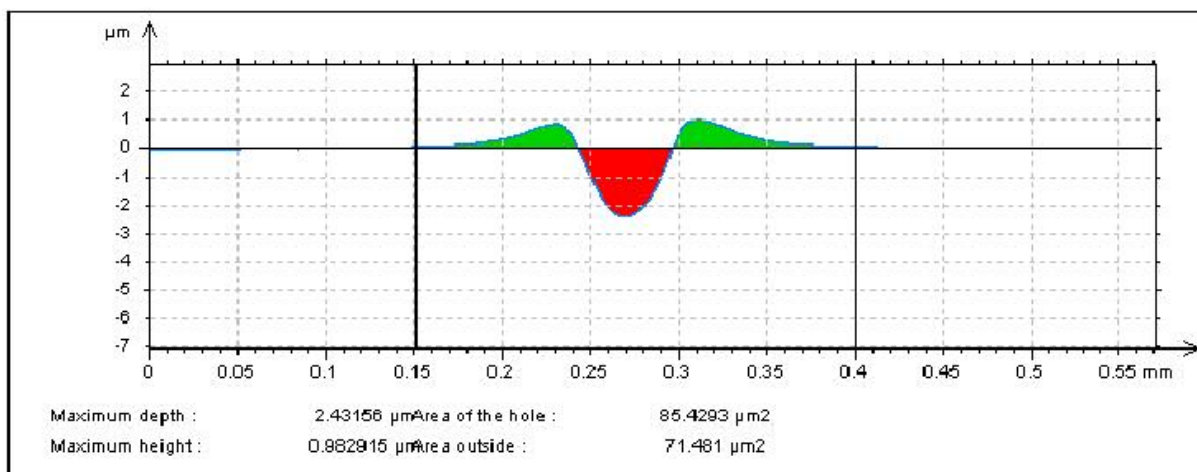


Figura 13 - Determinação das áreas do sulco e de material acumulado nas bordas do risco a partir do perfil médio

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

A figura 14 mostra uma visão 3D do risco formado no sistema Cementado quando submetido a uma carga normal de 5N. Através desta figura percebe-se a região onde ocorreu acúmulo de material, região alaranjada, e o próprio risco, em verde/amarelo.

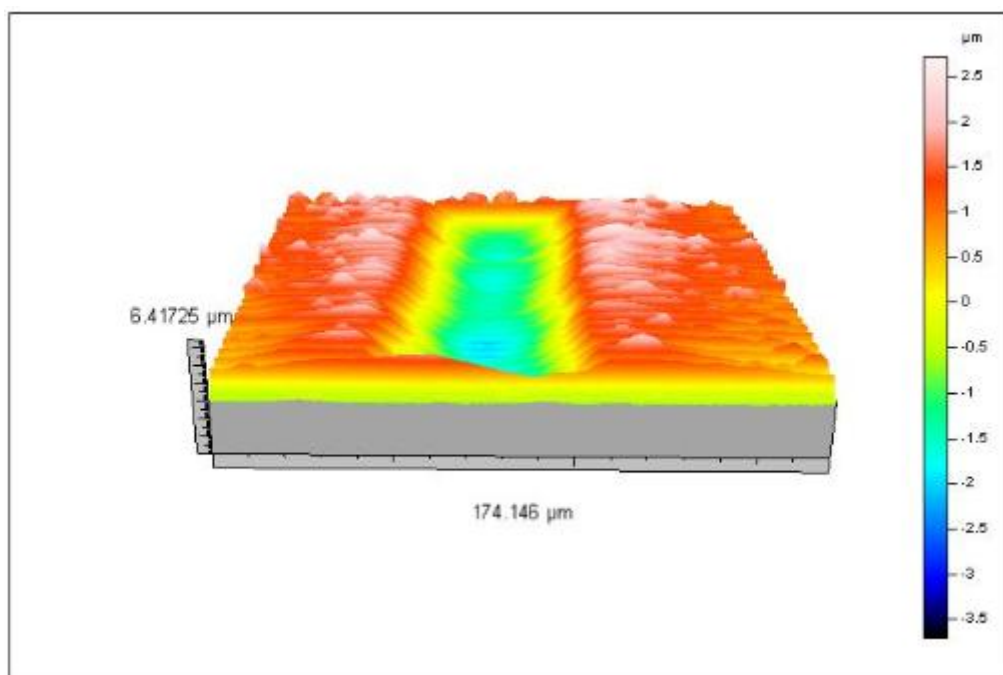


Figura 14 – Visão 3D do risco para o sistema cementado submetido a carga de 5N

No anexo A.3 é possível visualizar os perfis médios e as determinações das áreas para todos os casos, assim como uma vista em 3D dos riscos feitos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após serem realizados os testes, é necessária uma série de análises e comparações para chegar ao objetivo do trabalho. Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões obtidos em todos os testes que visam à caracterização mecânico-tribológica do material em questão.

### 4.1 CÁLCULO DO NÚMERO DE DUREZA AO RISCO

A análise realizada nesta seção diz respeito ao número de dureza ao risco obtido após os ensaios de riscamento.

Como descrito na seção 2.3.4, após cada risco, 3 larguras foram medidas. Sabendo que as equações (2.3) e (2.4) são maneiras distintas para se calcular o número de dureza ao risco ( $HS_p$ ), os resultados apresentados nesta seção foram obtidos através da expressão (2.4) por motivos de simplificação e para evitar a utilização da constante geométrica.

Através desta equação foi possível calcular o número de dureza ao risco ( $HS_p$ ) para cada caso. Na realidade, para cada largura calculou-se um  $HS_p$  e com esses valores chegou-se a um valor médio.

As figuras de 15 a 17 mostram as 3 medidas feitas no microscópio para o ensaio com o substrato (S0) quando submetido a uma carga normal de 19N.

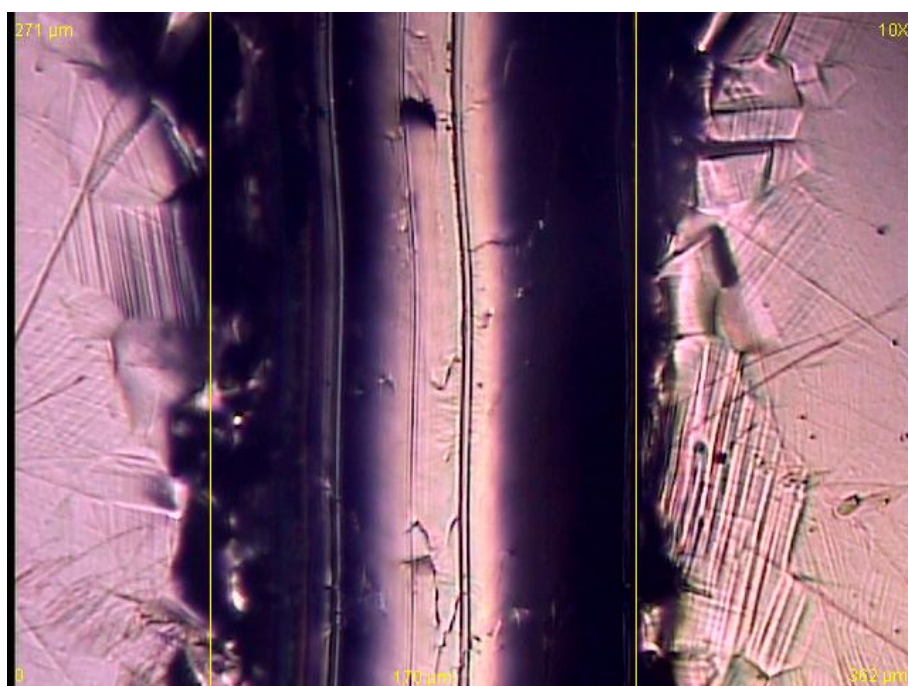


Figura 15 - Primeira medida de largura feita no microscópio: 170 µm, (S0 – 19N)

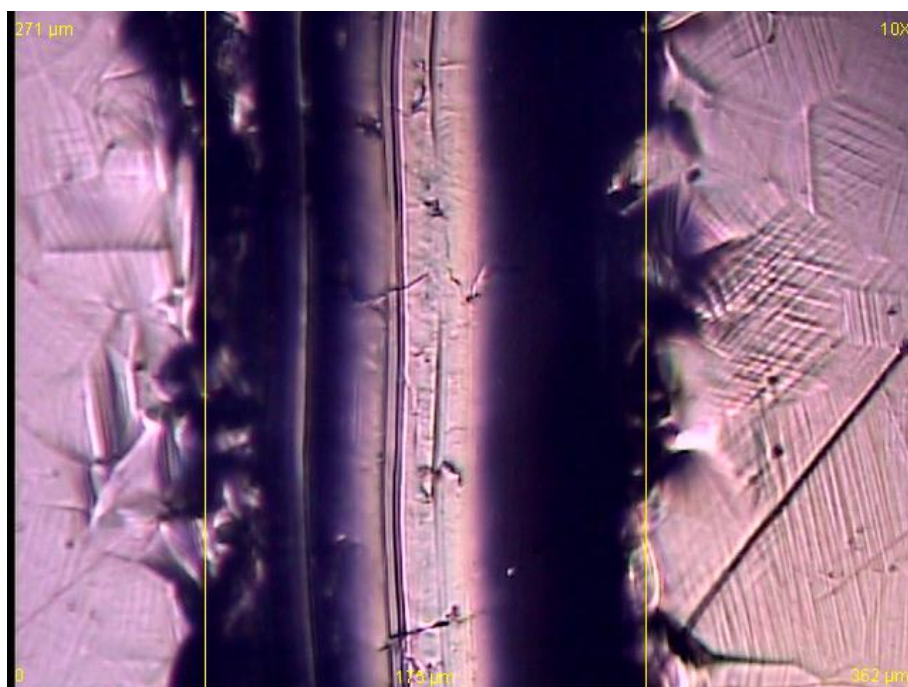


Figura 16 - Segunda medida de largura feita no microscópio: 175 µm, (S0 – 19N)

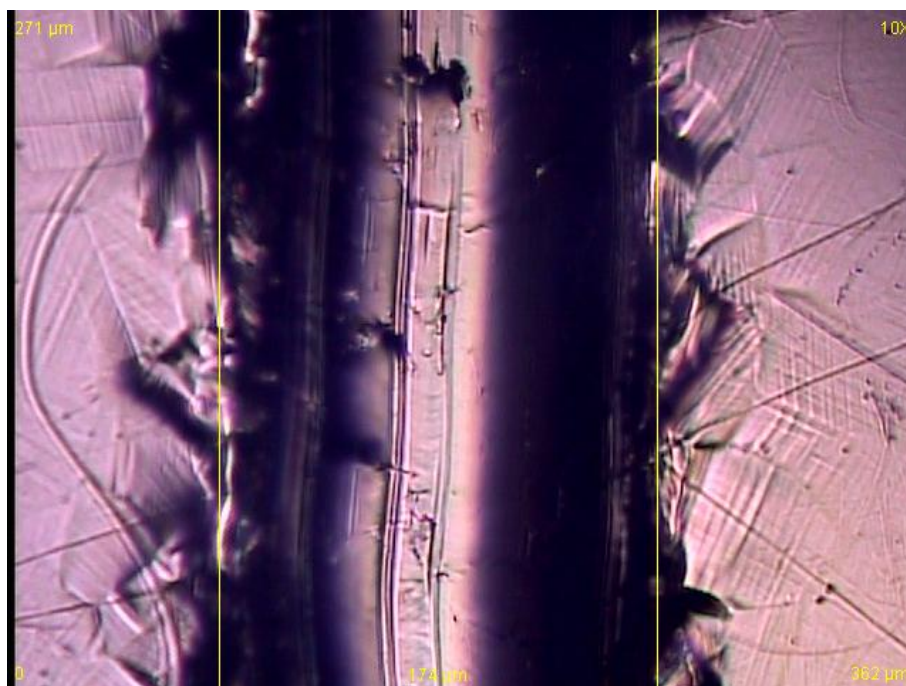


Figura 17 - Terceira medida de largura feita no microscópio: 174  $\mu\text{m}$ , (S0 – 19N)

Através destas figuras fica clara a dificuldade na medição precisa da largura do risco devido à dificuldade de localizar as extremidades do mesmo. Portanto, é fundamental seguir a norma citada e realizar as três medidas para utilizar uma média no cálculo da dureza ao risco. Desta forma, podem-se reduzir os erros de imprecisão durante a medição. As demais medições de largura, relativas aos ensaios com os sistemas S1 e S3 e para as outras cargas de S0, seguem tabeladas no anexo A.1.

Cada amostra foi submetida a apenas 4 ensaios, com cargas constantes (2, 5, 10 e 19N). Não foi possível realizar mais ensaios devido a falta de amostras disponíveis, apenas uma de cada sistema, e pela falta de espaço já que as mesmas foram previamente utilizadas em ensaios de microabrasão.

A Tabela 5 resume o resultado das durezas médias calculadas juntamente com as respectivas incertezas.

Tabela 5 - Dureza Média ao risco e seu desvio padrão para todos os sistemas

Força (N)	Dureza ao Risco (GPa)		
	Substrato (S0)	Cementado (S1)	Sequencial (S3)
2	$1,46 \pm 0,14$	$2,89 \pm 0,71$	$2,31 \pm 0,24$
5	$1,61 \pm 0,06$	$2,26 \pm 0,13$	$2,15 \pm 0,06$
10	$1,83 \pm 0,23$	$2,55 \pm 0,03$	$2,22 \pm 0,13$
19	$1,60 \pm 0,05$	$2,65 \pm 0,24$	$2,37 \pm 0,08$

Os resultados expressos na tabela a cima podem ser melhor visualizados no gráfico da figura 18:

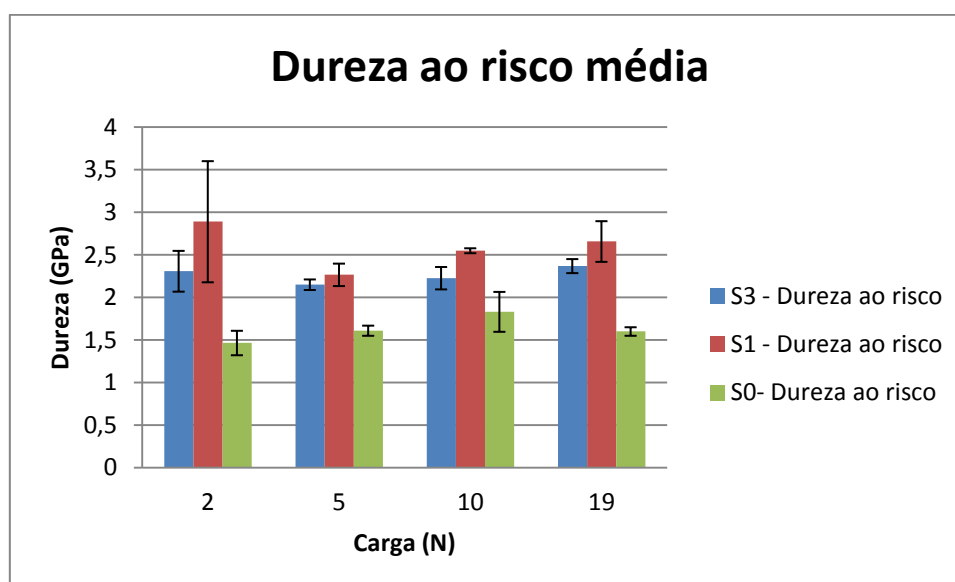


Figura 18 - Durezas ao risco para todos os sistemas em função da carga

Fazendo uma análise desses resultados, percebe-se que para os dois casos em que o sistema sofreu algum tratamento há um aumento em sua dureza ao risco. Este aumento é devido à formação da austenita expandida [3].

Como pode ser observado na figura acima, o sistema cementado apresenta maior dureza que o sequencial. Por exemplo, analisando o caso para a maior carga, no caso de 19N, temos um aumento de 65% devido à cementação, e um aumento de 48% devido ao tratamento sequencial de cementação e nitretação.

#### 4.1.1 Relação entre dureza convencional e dureza ao risco

Tanto o método de obtenção de dureza quasi estática (convencional) como o de dureza “dinâmica” (ao risco), são usados para obter informações a respeito da resistência a deformação plástica que o material experimenta. Entretanto, uma correlação mais precisa só pode ser realizada sob certas condições, pois normalmente no caso da dureza dinâmica alguns fatores são de difícil compreensão e o estado de tensões são diferentes para os 2 casos.

Para esta seção, foram utilizados alguns dados fornecidos do trabalho de OLIVEIRA [3]. Tais dados são referentes à dureza estática (Microdureza Vickers – HV) para os mesmos sistemas em questão neste estudo.

Para facilitar as análises e comparações, a tabela 6 foi adaptada e relata os valores de carga normal que mais se aproximam daqueles utilizados durante os ensaios de riscamento. Esses valores representam uma média de 10 valores medidos.

Tabela 6 - Dureza convencional de todos os sistemas. Adaptado de [2]

Força (N)	Dureza Convencional (GPa)		
	Substrato (S0)	Cementado (S1)	Sequencial (S3)
1,96	1,69 ± 0,11	3,76 ± 0,21	3,03 ± 0,16
4,9	1,71 ± 0,09	2,8 ± 0,15	2,37 ± 0,07
9,8	1,65 ± 0,07	2,35 ± 0,03	2,18 ± 0,05

A figura 19 resume os dados da tabela 6 em um gráfico.

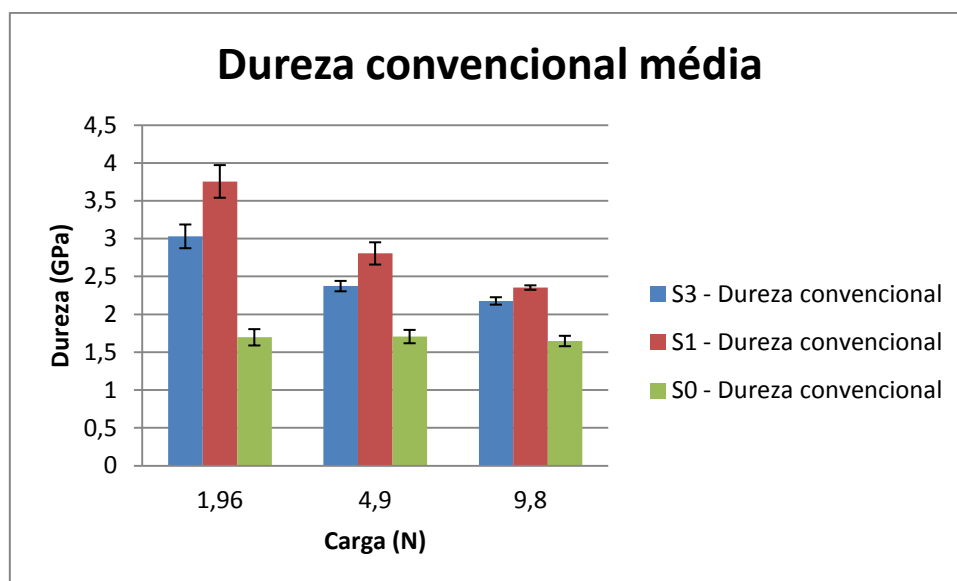


Figura 19 - Dureza convencional de todos os sistemas em função da carga aplicada

Fazendo uma comparação entre os resultados apresentados na seção anterior, relativos à dureza ao risco, e este de dureza convencional, chega-se ao gráfico representado na figura 20.

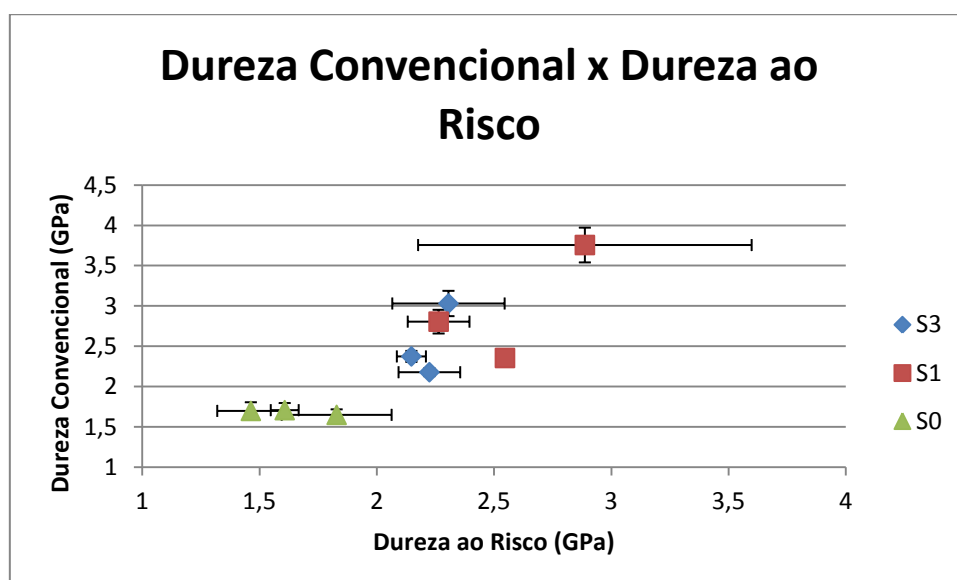


Figura 20 - Comparação entre dureza convencional e dureza ao risco

A partir desse gráfico comparativo da figura 20, podem-se observar algumas semelhanças, tais como:

- Aumento da dureza dos sistemas que foram submetidos a tratamentos superficiais a plasma, em relação ao substrato;
- Maior dureza do sistema cementado em relação ao sequencial, ou seja, a ordem de classificação das durezas é a mesma para todas as condições.

Entretanto, no caso da dureza convencional, as curvas apresentam uma clara tendência de redução na dureza à medida que se elevam as cargas. Este fato se deve ao processo de difusão. À medida que a profundidade aumenta, menores quantidades de nitrogênio/carbono estão presentes e a dureza tende a diminuir gradativamente devido a menor expansão da rede.

Já para o caso da dureza ao risco (dinâmica) as curvas não apresentam uma tendência tão clara. Isso pode ser explicado pela dificuldade de sua obtenção e por envolver inúmeros fatores que dificultam sua compreensão e análise, como taxa de deformação, velocidade de riscamento, atrito, possíveis formação de trincas e excessivo acúmulo de material nas bordas do sulco formado.

A figura 21 mostra de forma bem clara a excessiva deformação (região escura nas margens do sulco) do material quando submetido à carga normal de 19N. Além disso, é nítida a formação de trincas tanto no fundo do risco como nas bordas do mesmo. Portanto, como descrito na seção 2.3.2, os testes nestas condições podem ser invalidados.

Uma melhor análise para o “descarte/invalidação” dos ensaios com 19N nos sistemas S1 e S3 poderia ser feita analisando os riscos gerados através do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

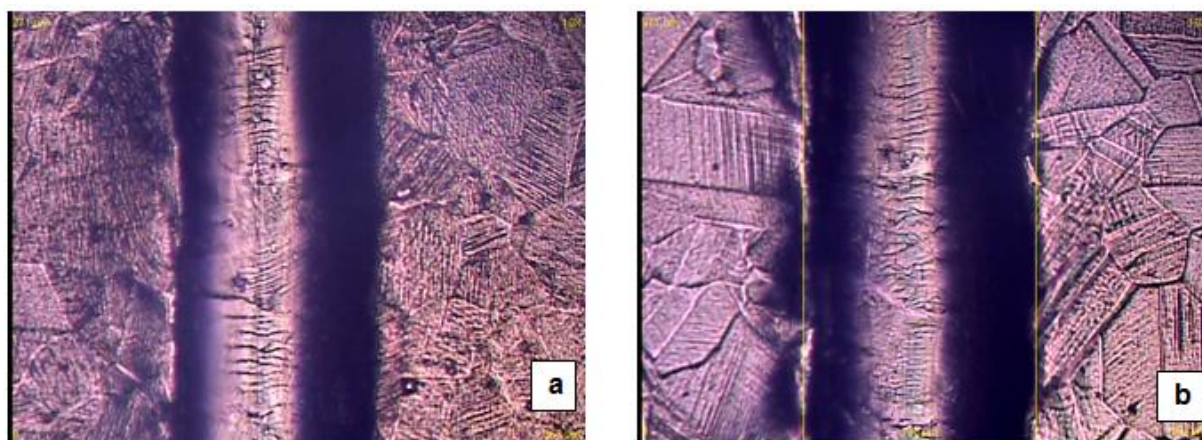


Figura 21 - Deformações e trincas causadas pelo ensaio de riscamento com aplicação de 19N. Respostas dos sistemas a) cementado e b) sequencial

A figura 22, fornecida pelo software da máquina responsável pelo ensaio de riscamento, possibilita visualizar além do risco formado, as variações da força de atrito, carga normal e coeficiente de atrito durante os ensaios. No anexo A.2 deste trabalho, seguem os demais resultados fornecidas pelo software.

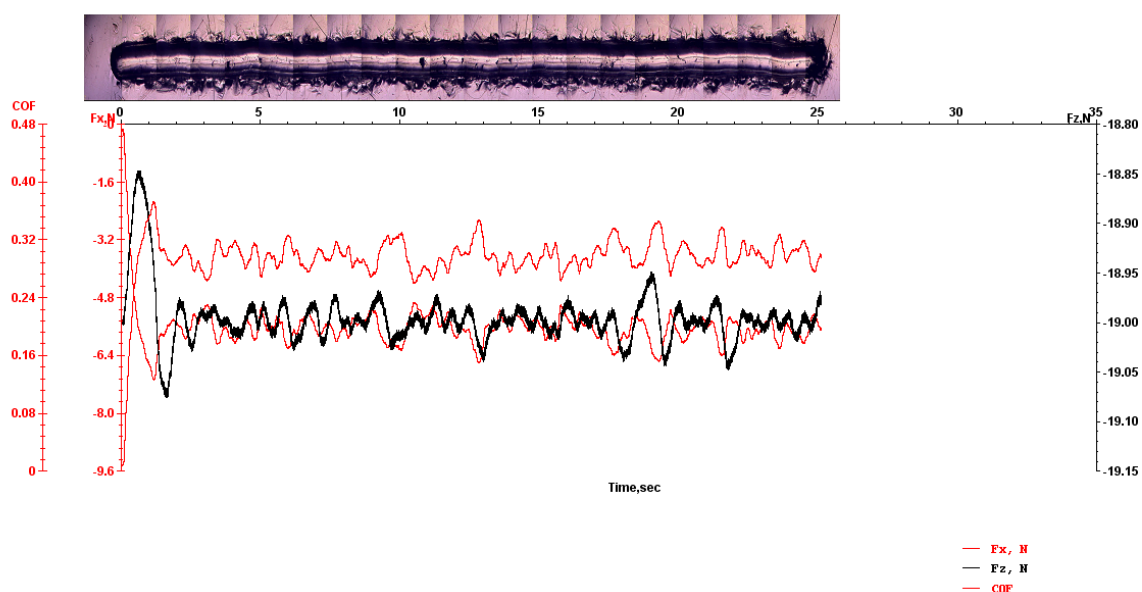


Figura 22 - Resultados para uma aplicação de carga normal de 19N no substrato (S0)

## 4.2 ANÁLISE DE PERFILOMETRIA

Com o objetivo de ampliar e refinar a caracterização do material submetido ao ensaio de riscamento, as amostras foram submetidas à análise de topografia 3D no perfilômetro.

Como descrito na seção 3.3.1, todas as amostras foram submetidas ao mesmo tratamento para possibilitar comparações.

As figuras a seguir mostram um exemplo realizado para a determinação do perfil do risco formado para o caso do sistema sequencial submetido a uma carga normal de 2N.

A figura 23 mostra o perfil médio do risco formado e a figura 24, a determinação das áreas do sulco formado (em vermelho) e de material deslocado (em verde).

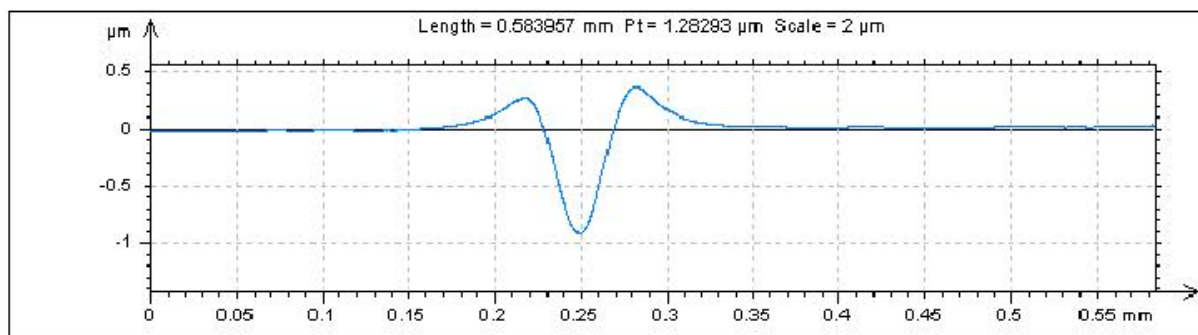


Figura 23 - Perfil médio do risco

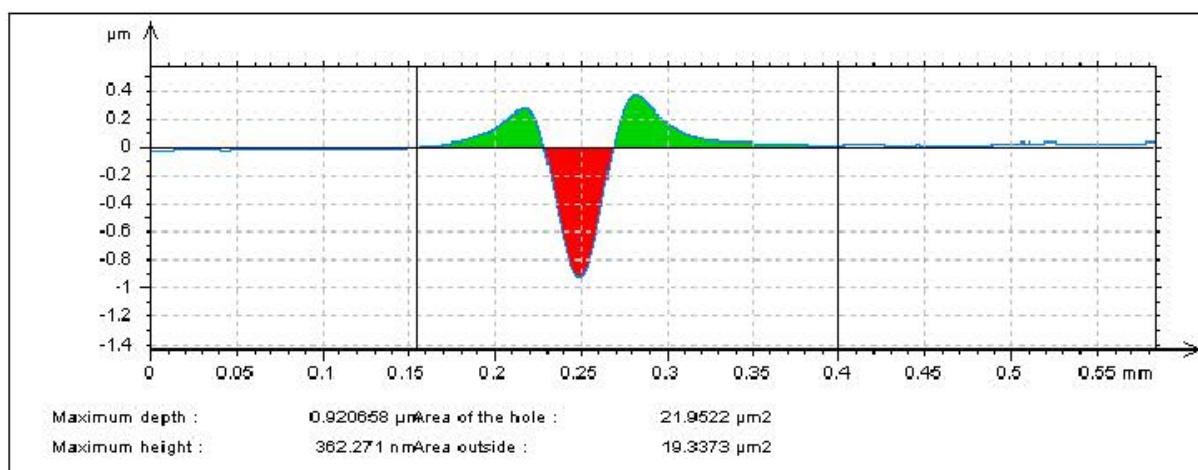


Figura 24 - Determinação das áreas do sulco formado e de material deslocado

No anexo A.3 é possível visualizar os perfis médios e as determinações das áreas para todos os casos, assim como uma vista em 3D dos riscos feitos.

A tabela 7 sumariza os resultados obtidos:

Tabela 7 - Resultados obtidos nas análises de perfilometria

Amostra	Carga (N)	Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	$A_v$ ( $\mu\text{m}^2$ )	$A1+A2$ ( $\mu\text{m}^2$ )	$f_{ab}$
<b>S3</b>	2	0,899	21,952	19,337	0,119
	5	2,448	91,042	77,679	0,147
	10	4,638	233,362	209,116	0,104
	19	8,005	542,954	495,334	0,088
<b>S1</b>	2	0,838	21,705	19,257	0,113
	5	2,378	85,429	71,481	0,163
	10	4,478	218,867	194,717	0,110
	19	7,662	494,096	409,709	0,171
<b>S0</b>	2	1,275	31,255	28,426	0,091
	5	2,897	111,316	100,205	0,100
	10	5,199	276,210	262,178	0,051
	19	8,931	647,605	600,744	0,072

Os parâmetros  $A_v$ ,  $A1+A2$  e  $f_{ab}$  são aqueles descritos na seção 2.2 e representados na expressão (2.1).

A figura 25 representa graficamente o parâmetro  $f_{ab}$ , que representa a razão entre o volume de material removido como detrito de desgaste e o volume do sulco criado.

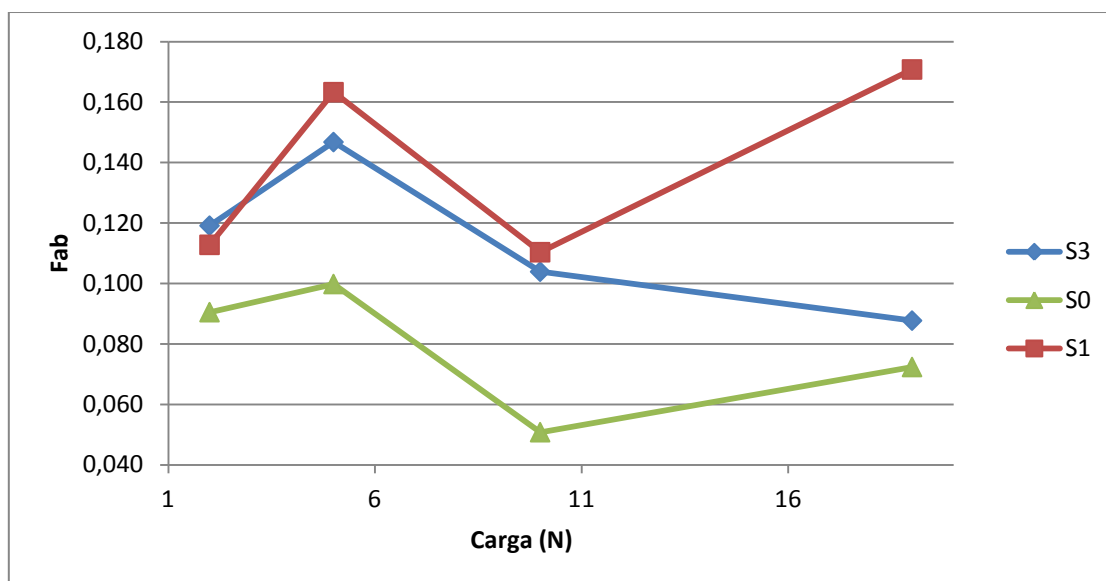


Figura 25 - Variação de  $f_{ab}$  com as cargas para todos os sistemas

A partir da figura 25 se percebe que as curvas dos 3 sistemas apresentam tendências semelhantes. Para o sistema cementado (S1) a relação apresenta os maiores valores em comparação com o substrato (S0) e com o sistema sequencial (S3). Dessa forma, o sistema S1 é o que mais sofre perda de material, e isso pode ser explicado pelo fato de ser o sistema com maior dureza, tanto estática como dinâmica e por possuir menor capacidade de deformação e maior tendência à formação de cavacos e trincas [7].

Entretanto, mesmo para S1 os valores da fração  $f_{ab}$  são bem pequenos, demonstrando que para todos os casos o volume de material removido é muito pequeno e se aproximam mais do caso do microsulcamento puro, onde  $f_{ab} = 0$ , ou seja, durante os ensaios de riscamento realizados praticamente não houve remoção de material, havendo quase que unicamente um deslocamento de material para as bordas do sulco.

Observa-se ainda que da fração  $f_{ab}$  para o substrato (S0) de aço inoxidável AISI 316 apresenta os menores valores devido a sua grande capacidade de deformação. Os valores dessa fração para os sistemas S1 e S3 também são pequenos e para explicar o motivo desse comportamento, apresentamos na figura 26 um gráfico da profundidade do risco em função da carga para os 3 sistemas.

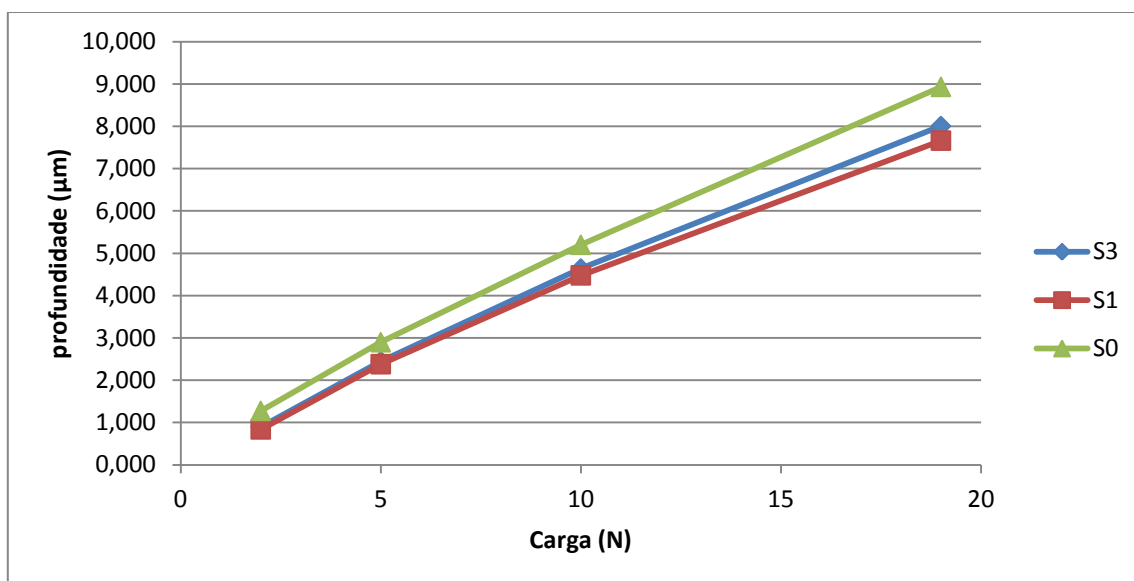


Figura 26 - Profundidade do sulco formado em função da carga

Como descrito na seção 3.1 deste trabalho, as espessuras das camadas cementada e sequencial (cementada + nitretada) são de 14  $\mu\text{m}$  e 8  $\mu\text{m}$  respectivamente. Além disso, sabe-se que essas camadas não são homogêneas. Quanto mais se avança em direção ao substrato, menores são as concentrações de carbono e/ou nitrogênio, e dessa forma menores são os efeitos de endurecimento.

A partir da figura 26 nota-se que para S1 e S3 as profundidades do sulco chegam a aproximadamente 8  $\mu\text{m}$  para cargas normais de 19N, ou seja, chegam a regiões onde os efeitos das camadas endurecidas são relativamente baixos e o efeito do substrato é predominante. Portanto, mesmo para os sistemas endurecidos o efeito do substrato é predominante, explicando assim os baixos valores fração  $f_{ab}$  também para os sistemas S1 e S3.

#### 4.2.1 Determinação da largura do risco através da perfilometria

Através da perfilometria também é possível determinar a largura do sulco formado e, consequentemente, calcular o número de dureza ao risco. Nesse intuito, as larguras foram medidas a partir dos perfis médios, descritos na seção 3.3.1. A figura 27 mostra um exemplo dessa medida, neste caso para o sistema cementado submetido a carga normal de 10N.

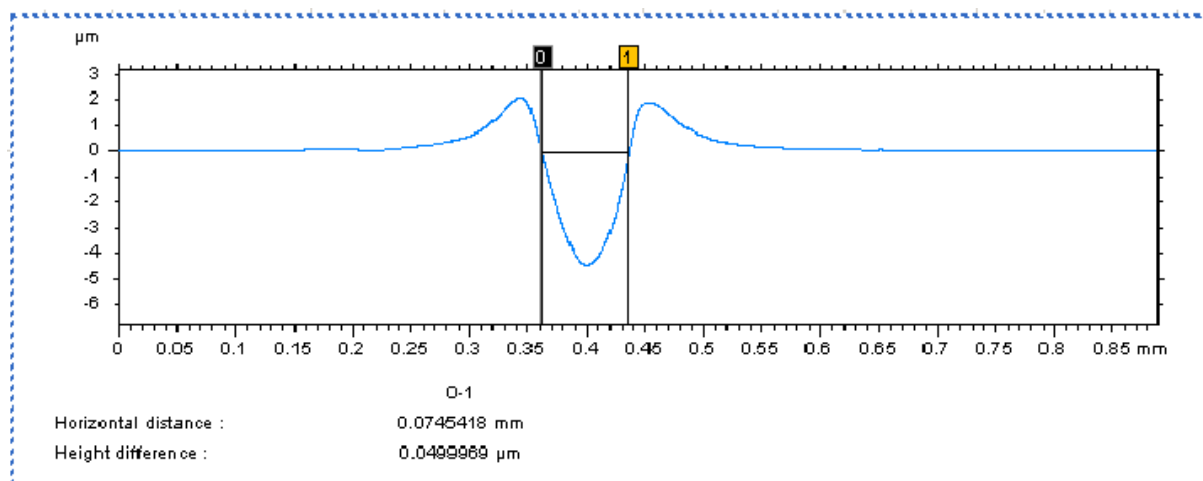


Figura 27 – Medida da largura do sulco a partir do perfil médio (ex: S1 – 10N)

As demais medidas de largura ( $w$ ) e o número de dureza (HSp) calculado a partir destas seguem na tabela 8.

Tabela 8 - Medidas das larguras feitas através das análises de perfilometria

Carga Normal (N)	Substrato (S0)		Cementado (S1)		Sequencial (S3)	
	$w$ ( $\mu\text{m}$ )	HSp (GPa)	$w$ ( $\mu\text{m}$ )	HSp (GPa)	$w$ ( $\mu\text{m}$ )	HSp (GPa)
<b>2</b>	39,1	3,3	31,2	5,2	38,5	3,4
<b>5</b>	56,3	4,0	53,7	4,4	59,1	3,6
<b>10</b>	79,1	4,1	74,5	4,6	83,1	3,7
<b>19</b>	103,6	4,5	99,8	4,9	109,6	4,0

A partir da tabela 8 podemos comparar o número de dureza calculado com as larguras sendo medidas com o microscópio ótico, seção 4.1, e com as larguras sendo medidas através da perfilometria. A figura 28 mostra os resultados do número de dureza apresentados na tabela 8.

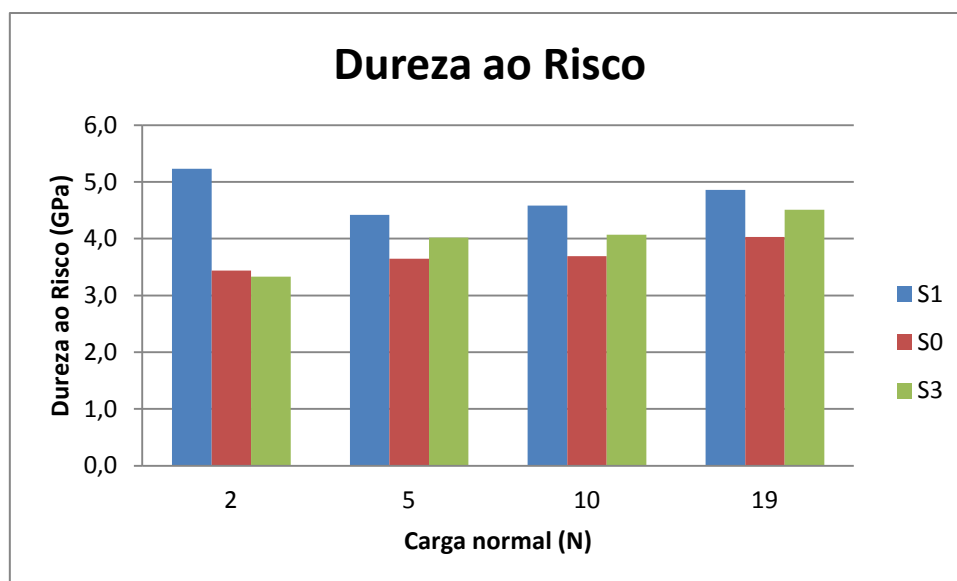


Figure 28 – Dureza ao risco obtida com medições de largura realizadas durante a perfilometria

A partir dessa nova medida de largura e conseqüente nova determinação do número de dureza ao risco, pode-se comparar esses novos valores com os demais calculados anteriormente na seção 4.2.

A figura 29 mostra um gráfico comparativo entre a dureza ao risco obtida com medições de largura realizadas através do microscópio acoplado a máquina de ensaio de riscamento e a dureza ao risco calculada com as larguras sendo medidas durante as análises de perfilometria. Essas referentes as medições na perfilometria não possuem medidas do desvio padrão pois foi realizada apenas uma medição para cada risco, no caso o risco médio.

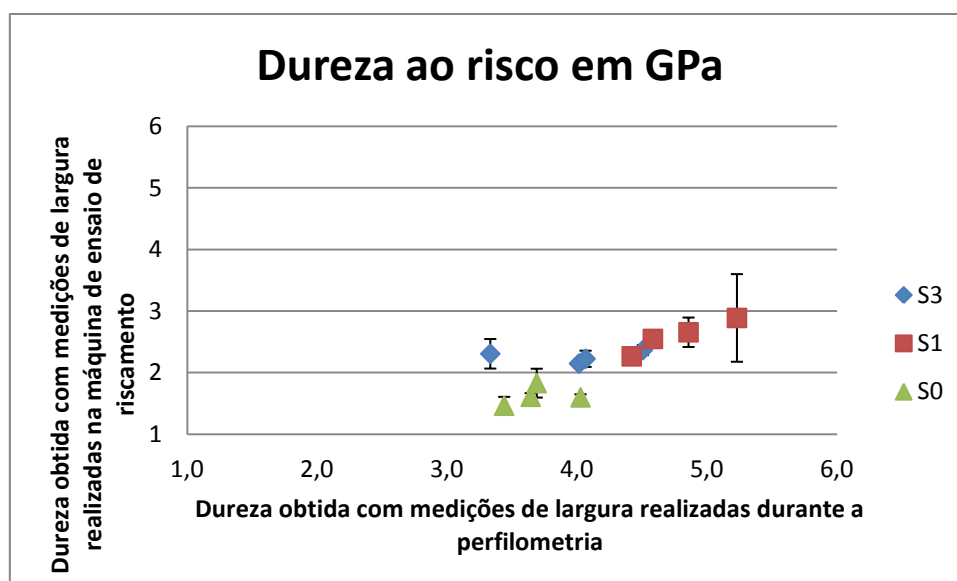


Figura 29 - Comparação entre durezas ao risco segundo o método utilizado na medição da largura

A partir da figura 29 percebe-se claramente que os valores de dureza ao risco obtidos através das medições de largura, para todos os sistemas, realizadas na perfilometria são superiores aqueles obtidos com as medições de larguras feitas diretamente na máquina de ensaio de riscamento.

Primeiramente, os métodos de medição utilizados são distintos. As medições feitas diretas seguiram a norma ASTM G171-03 [8] e para isto 3 medidas de larguras foram realizadas através de um microscópio ótico, e assim chegou a um valor médio para o cálculo da dureza ao risco. Já as medições realizadas durante a caracterização topográfica utilizaram um perfil médio e a partir dele mediram-se as larguras com a ajuda do software *TalyMap Gold 4.1* como descrito no início desta seção.

Como os dois métodos obtêm diferentes valores para as larguras do sulco formado, diferentes valores de dureza ao risco são obtidos.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, notou-se a importância do ensaio de riscamento na caracterização do material, porém ficou clara a dificuldade na definição de alguns parâmetros, como a largura do risco, que pode gerar imprecisões nos resultados e a necessidade da padronização para gerar resultados confiáveis e intercambiáveis.

Além dessa dificuldade, observou-se a necessidade da inclusão da metodologia incluindo perfilometria 3D à norma ASTM para caracterizar completamente a área de desgaste abrasivo e distinguir riscos que possuem o mesmo diâmetro, mas que não necessariamente apresentam o mesmo perfil volumétrico. Assim, percebe-se que diferenças no material podem não ser observadas somente fazendo uma análise com base na largura do risco.

Os resultados mostraram que os tratamentos superficiais termoquímicos a plasma são eficazes no aumento da dureza do substrato, e dessa forma permitem que componentes tratados sejam utilizados em aplicações em que além de resistência a corrosão também seja necessária boa resistência ao desgaste.

Observou-se ainda que apesar de tanto a dureza dinâmica, obtida mediante o ensaio de riscamento, como a dureza quasi estática representarem uma medida de deformação plástica do material quando sujeito a força de um indentador, elas são difíceis de serem correlacionadas.

As análises de perfilometria mostraram que o sistema com maior dureza, o cimentado, apresentou maior perda de material em relação à quantidade de material deslocado para as bordas do risco. Ainda assim, essa perda foi bem pequena mostrando que para todos os casos estudados neste trabalho praticamente não houve remoção de material devido ao ensaio de riscamento e o que predominou foi o efeito do substrato.

Durante as análises de perfilometria, notou-se ainda que a determinação da largura a partir do perfil médio geram diferentes significantes no número de dureza ao risco em relação as medições realizadas diretamente no ensaio de riscamento.

## 6 SUGESTÕES

Visando aprimorar os resultados obtidos, para futuros trabalhos pode-se propor uma análise dos riscos gerados através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) para melhor caracterizar o deslocamento de material e a formação de trincas, além de possibilitar o descarte/invalidação do teste em caso de danos severos a superfície testada.

Ainda, visando aprimorar os resultados, mais ensaios de riscamento poderiam ser feitos, gerando assim maior repetibilidade e reprodutibilidade com o intuito de minimizar a probabilidade de erros na execução do experimento e observar melhor a tendência das respostas do material submetido aos testes.

Além disso, seria interessante realizar um cálculo do coeficiente de arraste do indentador para analisar a resistência que a superfície riscada oferece ao deslocamento de material realizado pelo indentador.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HSU, K.L., AHN, T.M., RIGNEY, D.A. (1980). **Wear** 60, 13.
- [2] WHITTLE, R.D., SCOTT, V.D. (1984). **Met. Technol.** 11, 231.
- [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] **ASM Handbook; Mechanical Testing and Evaluation** (1996). 2.ed. Ohio: ASM International. Vol.8, pp. 676-2235.
- [5] WILLIAMS, S.R. (1942) **Hardness and Hardness Measurements.** American Society for Metals.
- [6] STROUD, M.F., WILMAN, H. (1962). **The proportion of the groove volume removed as wear in abrasion of metals.** Brit.J.Appl.Phys.
- [7] 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.
- [8] **Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus<sup>1</sup>**, ASTM International, designação: G171-03, reprovado em 2009
- [9] CALLISTER, WILLIAM D. JR. (2000). **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução.** 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC.
- [10] COMINELI, O. G. (2010). **Fundamentos Tecnológicos da Fabricação do Aço.** Departamento de Engenharia Mecânica – UFES.
- [11] ALVES JR, C. **Nitreção a Plasma – Fundamentos e Aplicações.** Apostila.
- [12] **Plasma Carburising.** [Acessado em: 25 de maio de 2012] <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.
- [14] KAMMINGA, J. –D., ALKEMADE, P. F. A., JANSSEN, G. C. A. M. **Scratch Test analysis of coated and uncoated nitride steel.** Surface and Coatings Technology. Elsevier.

## ANEXOS

### A.1

As medidas das 3 larguras (L1,L2 e L3) e da largura média (Lm) de todos os sistemas realizadas no microscópio acoplado ao equipamento CETR de ensaio de riscamento seguem nas tabelas a seguir:

Tabela A.1.1: Larguras relativas aos ensaios envolvendo o sistema S1

Amostra		Medida da largura w em ( $\mu\text{m}$ )			
S1	Carga (N)	L1	L2	L3	Lm
	2	47	37	42	$42 \pm 5$
	5	76	72	75	$74,33 \pm 2,08$
	10	101	100	100	$100 \pm 100,33$
	19	136	126	135	$132,33 \pm 5,51$

Tabela A.1.2: Larguras relativas aos ensaios envolvendo o sistema S3

Amostra		Medida da largura w em ( $\mu\text{m}$ )			
S3	Carga (N)	L1	L2	L3	Lm
	2	45	47	50	$47,33 \pm 2,52$
	5	77	77	79	$77,67 \pm 1,15$
	10	109	107	103	$106,33 \pm 3,06$
	19	146	141	143	$143,33 \pm 2,52$

Tabela A.1.3: Larguras relativas aos ensaios envolvendo o sistema S0

Amostra		Medida da largura w em ( $\mu\text{m}$ )			
S0	Carga (N)	L1	L2	L3	Lm
	2	60	55	59	$58 \pm 2,65$
	5	89	92	89	$90 \pm 1,73$
	10	118	133	117	$122,67 \pm 8,96$
	19	170	175	174	$173 \pm 2,65$

## A.2

Os resultados fornecidos pelo software (*Viewer*) acoplado ao equipamento de ensaio de riscamento seguem nas figuras A.2. Nelas, observa-se uma visão completa do risco, além das variações de carga normal ( $F_z$ ), força tangencial, força de atrito ( $F_x$ ) e o coeficiente de atrito (COF).

Devido a problemas do software, 3 resultados não puderam ser obtidos neste formato. São eles: carga de 5N no sistema S1 e cargas de 2N e 10N no sistema S3.

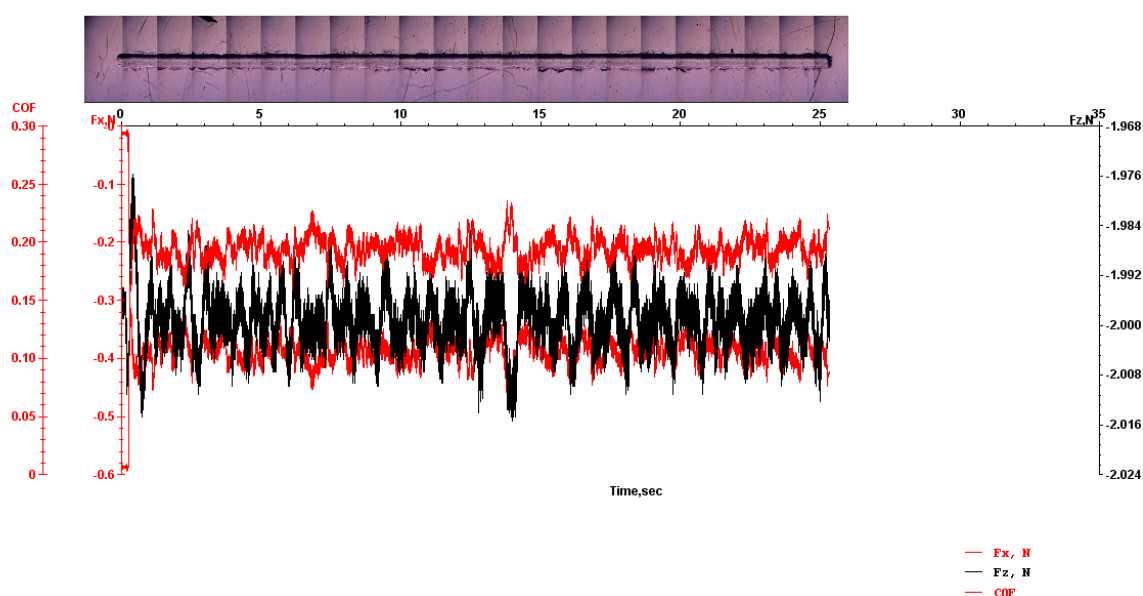


Figura A.2.1: Resultados para uma aplicação de carga normal de 2N no substrato (S0)

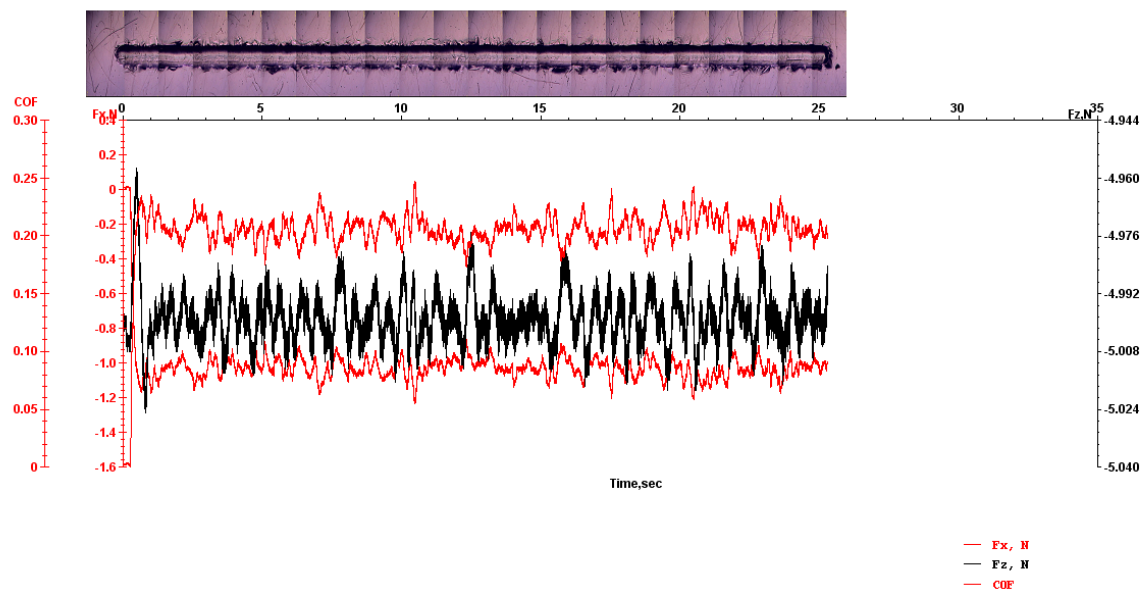


Figura A.2.2: Resultados para uma aplicação de carga normal de 5N no substrato (S0)

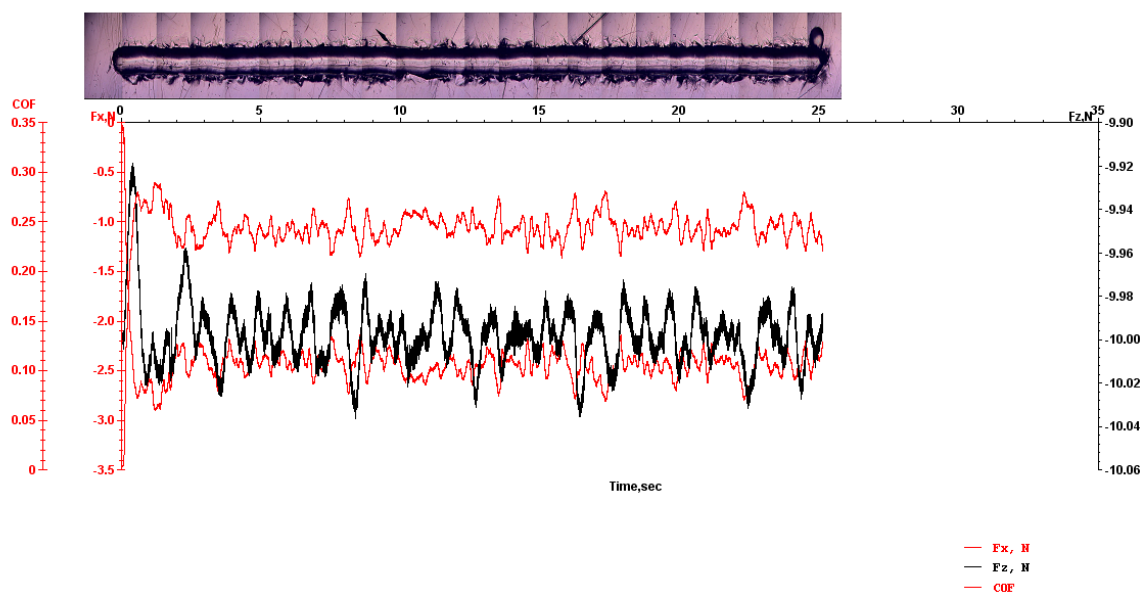


Figura A.2.3: Resultados para uma aplicação de carga normal de 10N no substrato (S0)

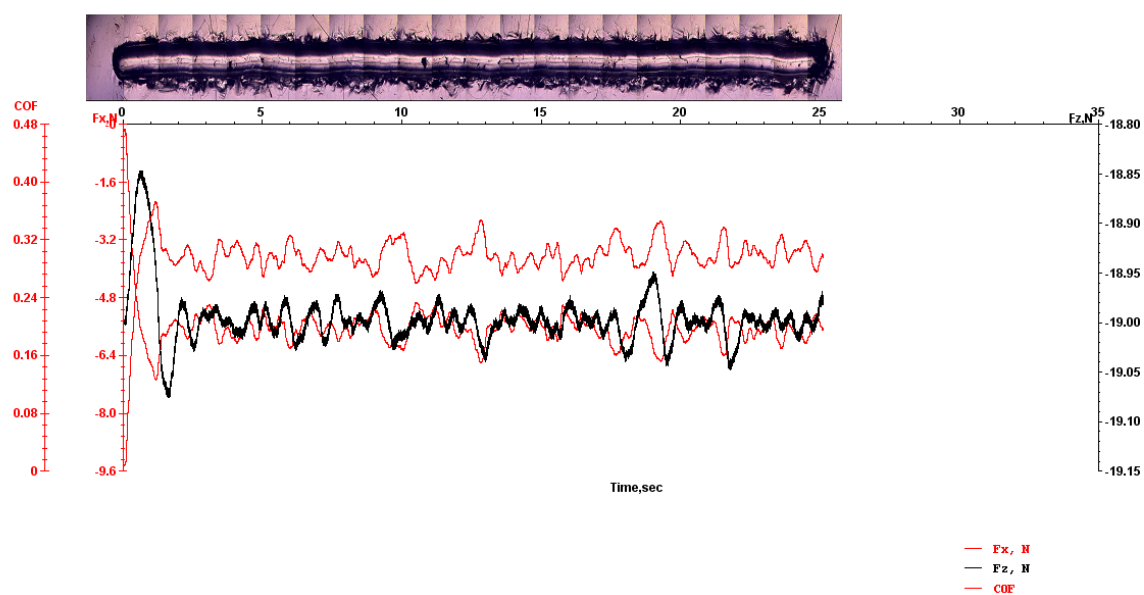


Figura A.2.4: Resultados para uma aplicação de carga normal de 19N no substrato (S0)

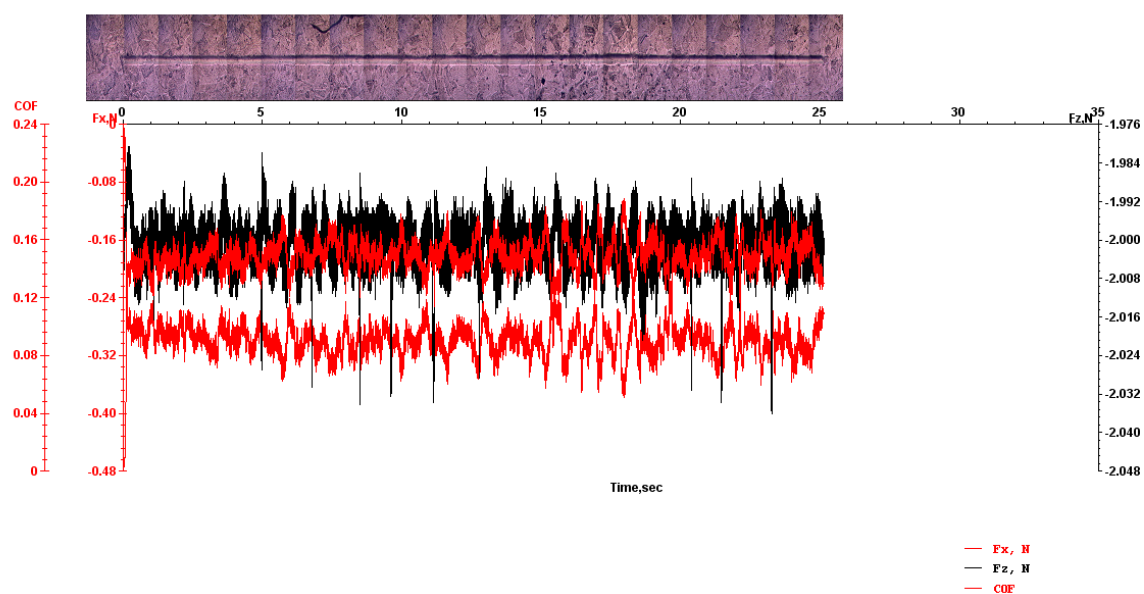


Figura A.2.5: Resultados para uma aplicação de carga normal de 2N no sistema S1

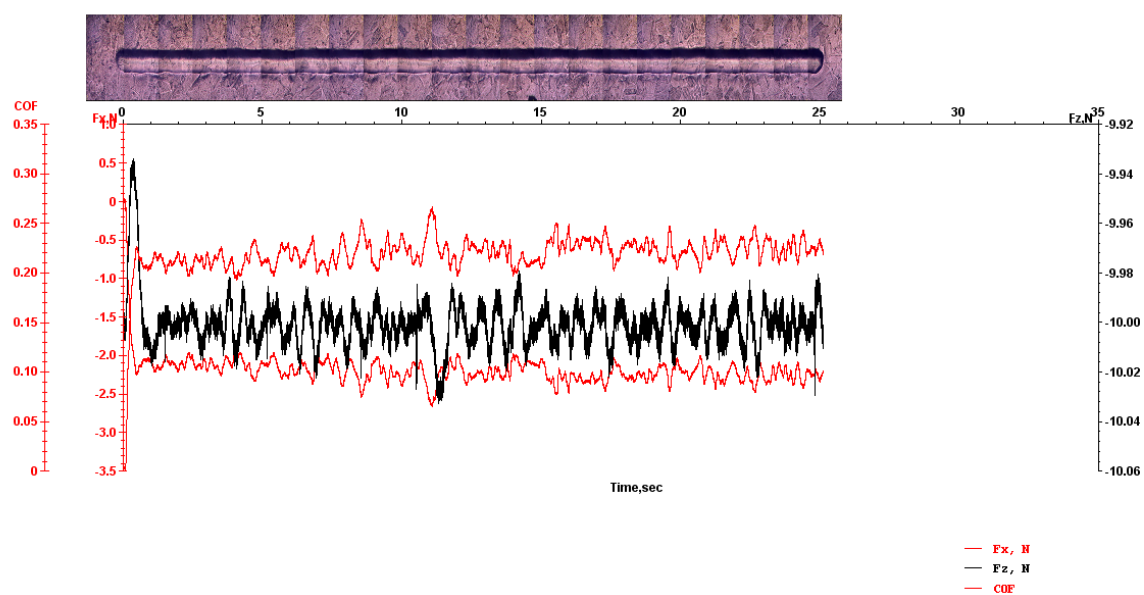


Figura A.2.6: Resultados para uma aplicação de carga normal de 10N no sistema S1

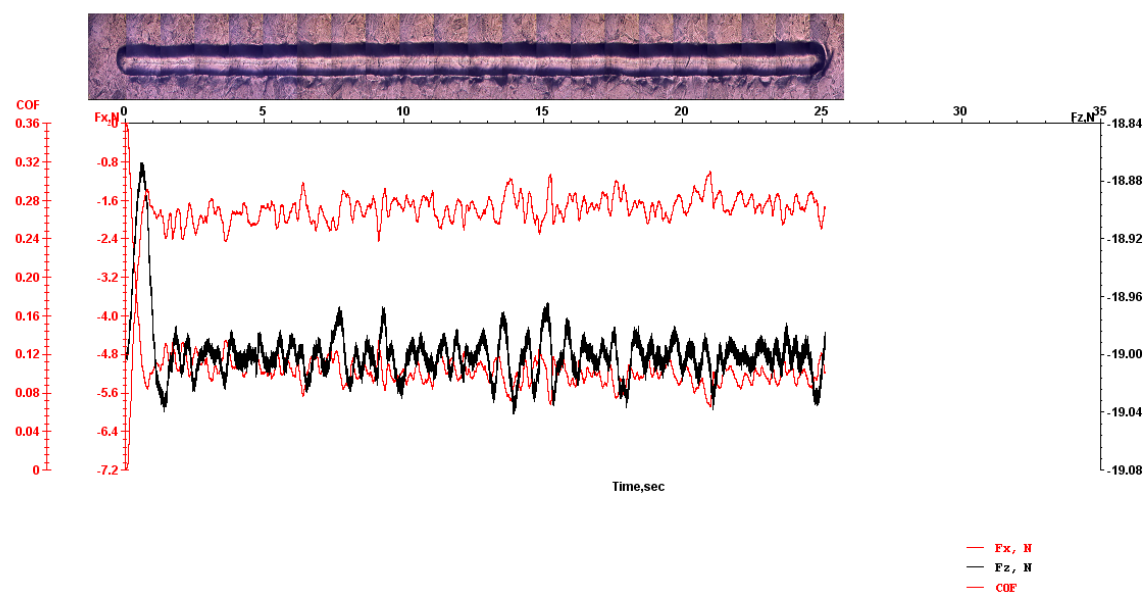


Figura A.2.7: Resultados para uma aplicação de carga normal de 19N no sistema S1

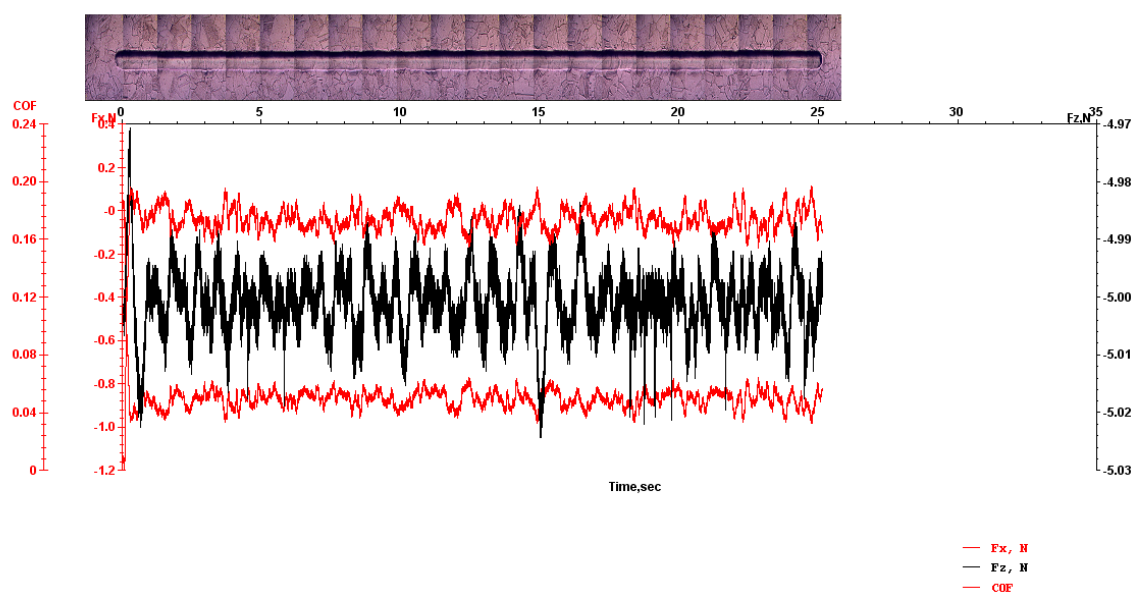


Figura A.2.8: Resultados para uma aplicação de carga normal de 5N no sistema S3

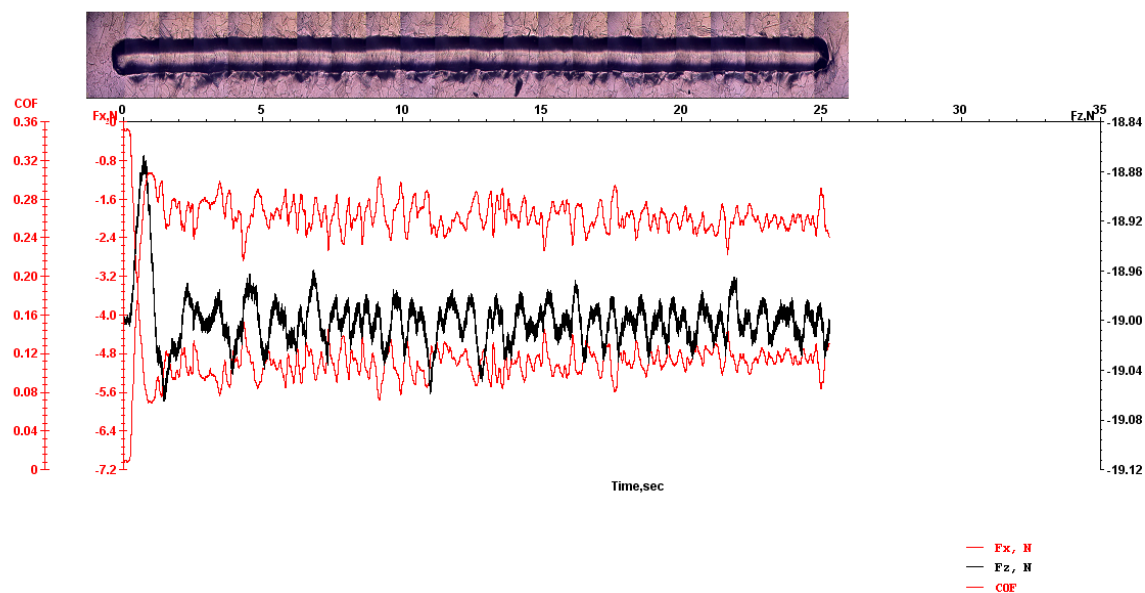


Figura A.2.9: Resultados para uma aplicação de carga normal de 19N no sistema S3

## A.3

As figuras a seguir foram obtidas através do software *TalyMap Gold 4.1* utilizado juntamente ao equipamento de perfilometria utilizado. Na determinação das áreas, a parte em vermelho representa a área do sulco formado, e em verde, a área de material deslocado.

- Sequencial – Carga de 2N

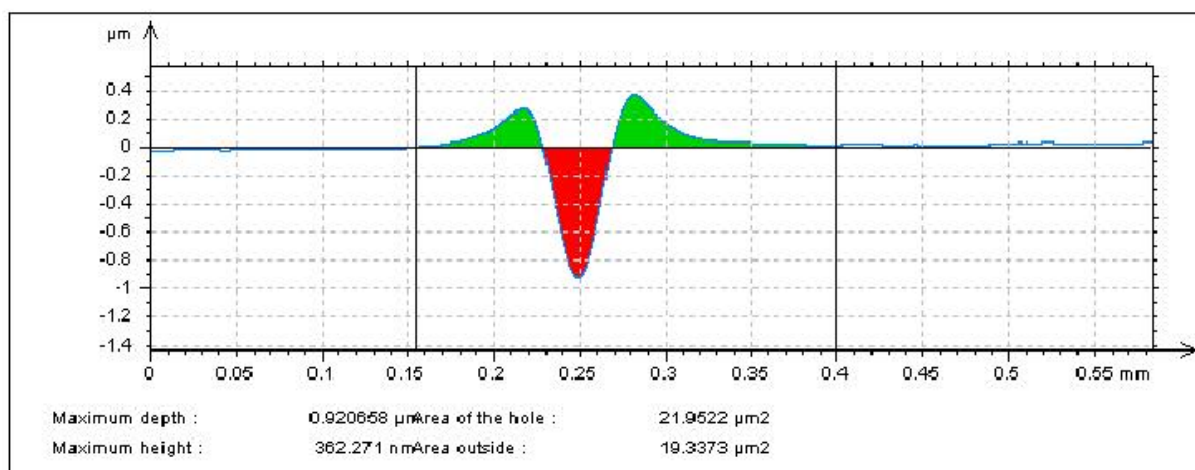


Figura A.3.1: Perfil médio e determinação das áreas de sulco e de material deslocado (S3 – 2N)

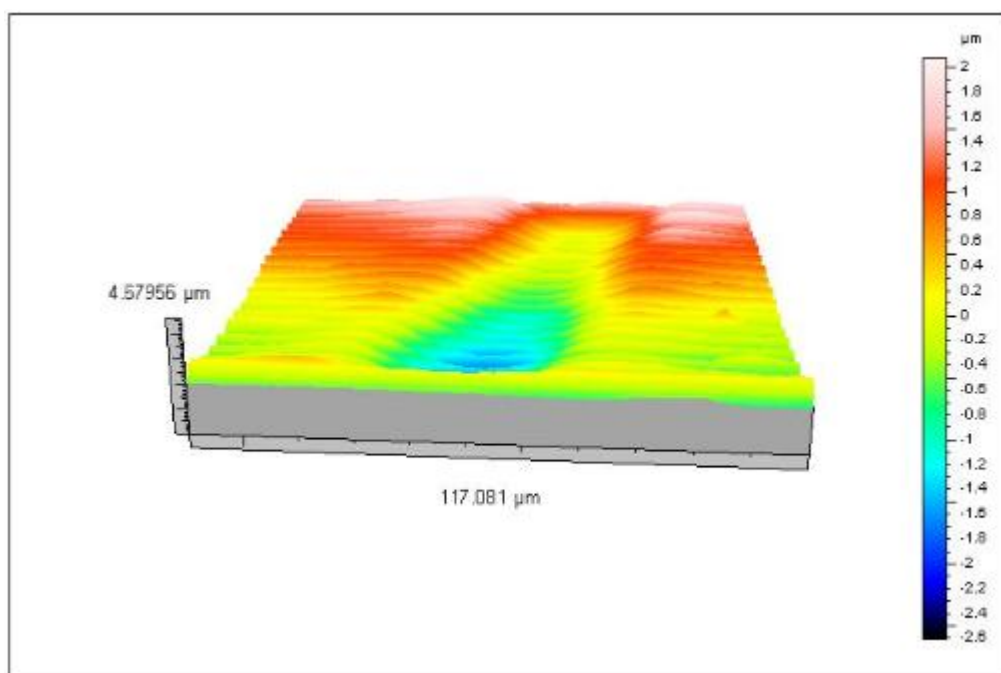


Figura A.3.2: Visão 3D do risco (S3 – 2N)

- Sequencial – Carga Normal de 5N

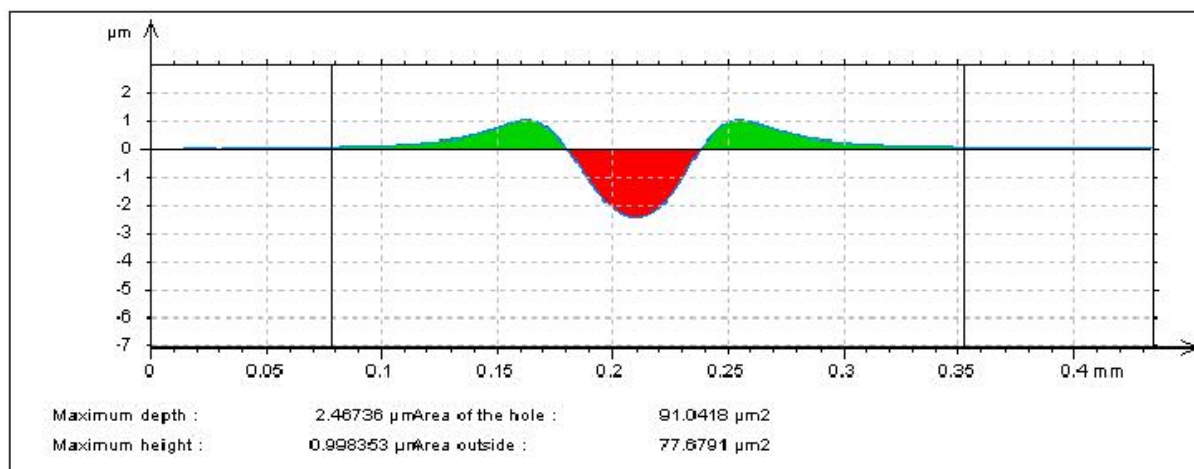


Figura A.3.3: Perfil médio e determinação das áreas de sulco e de material deslocado (S3 – 5N)

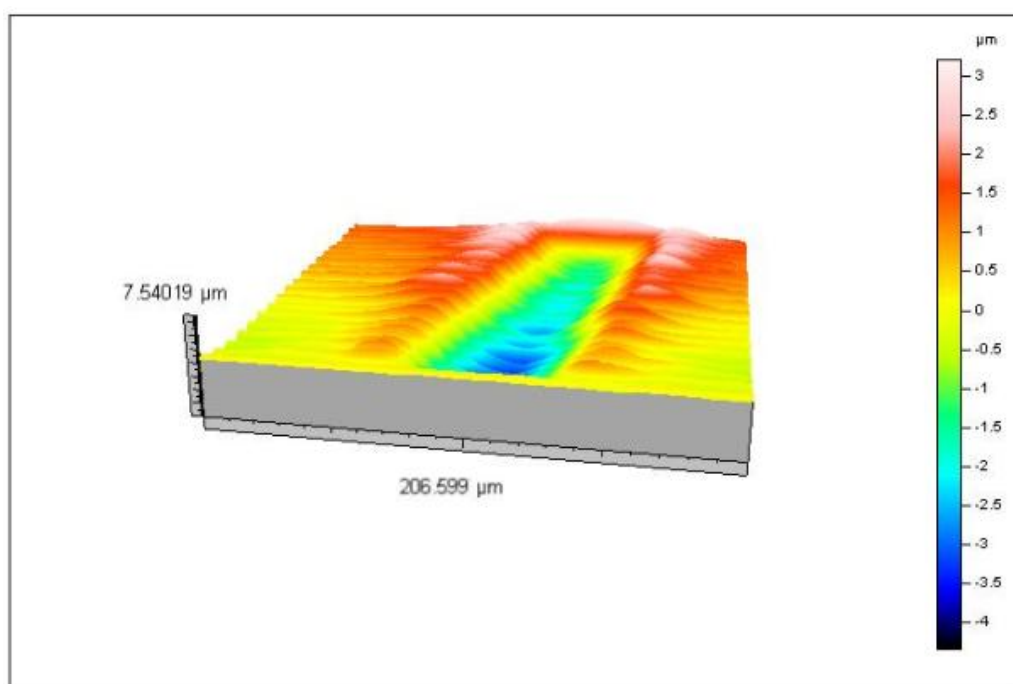


Figura A.3.4: Visão 3D do risco (S3 – 5N)

- Sequencial – Carga Normal de 10N

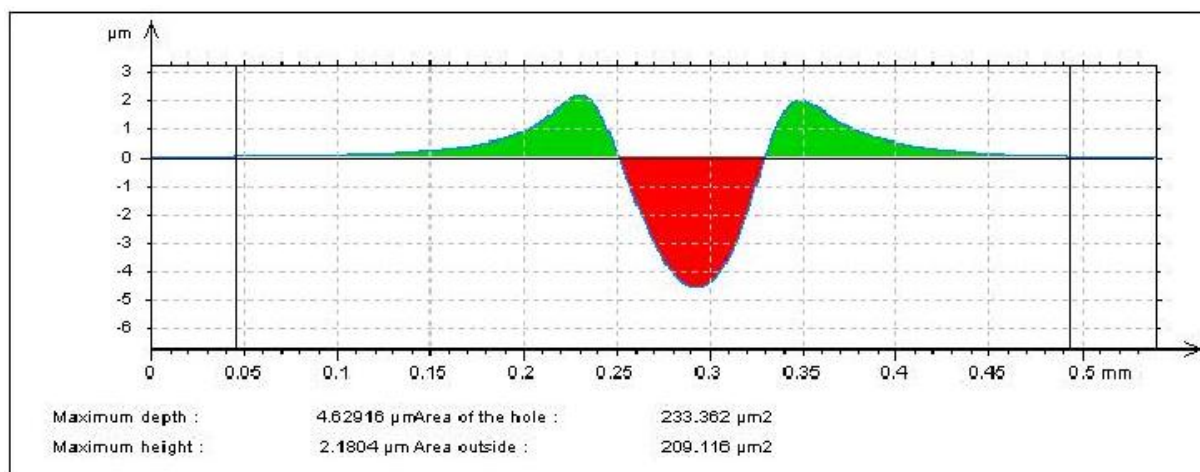


Figura A.3.5: Perfil médio e determinação das áreas de sulco e de material deslocado (S3 – 10N)

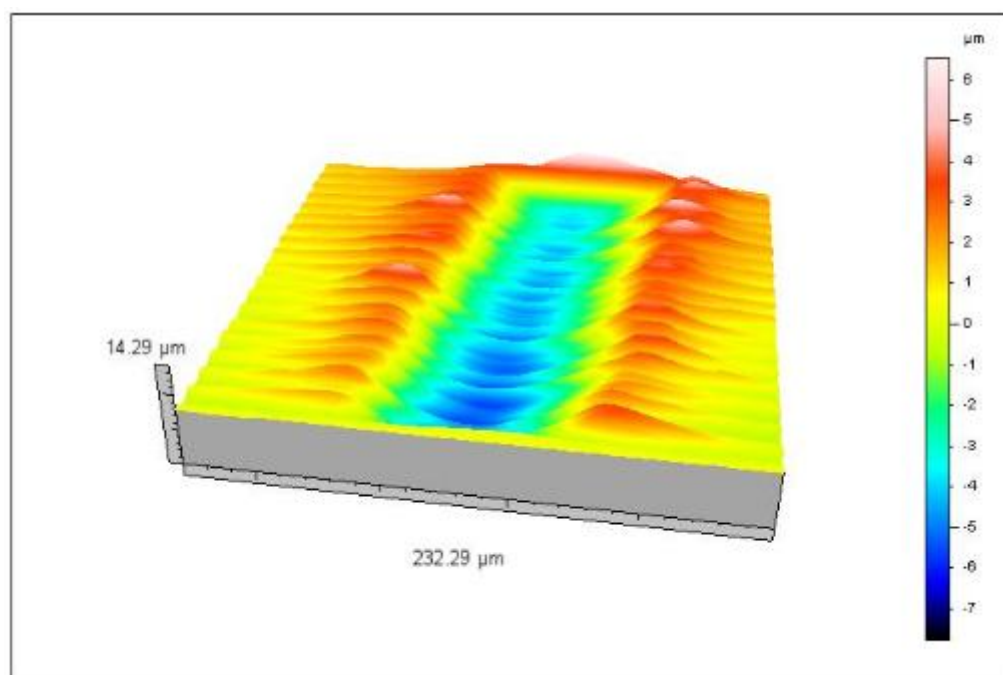


Figura A.3.6: Visão 3D do risco (S3 – 10N)

- Sequencial – Carga Normal de 19N

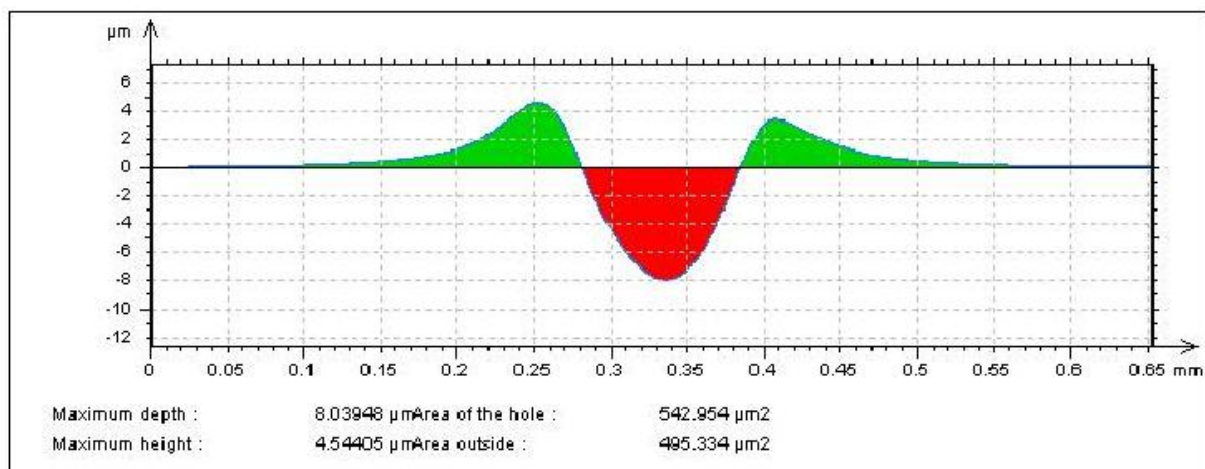


Figura A.3.7: Perfil médio e determinação das áreas de sulco e de material deslocado (S3 – 19N)

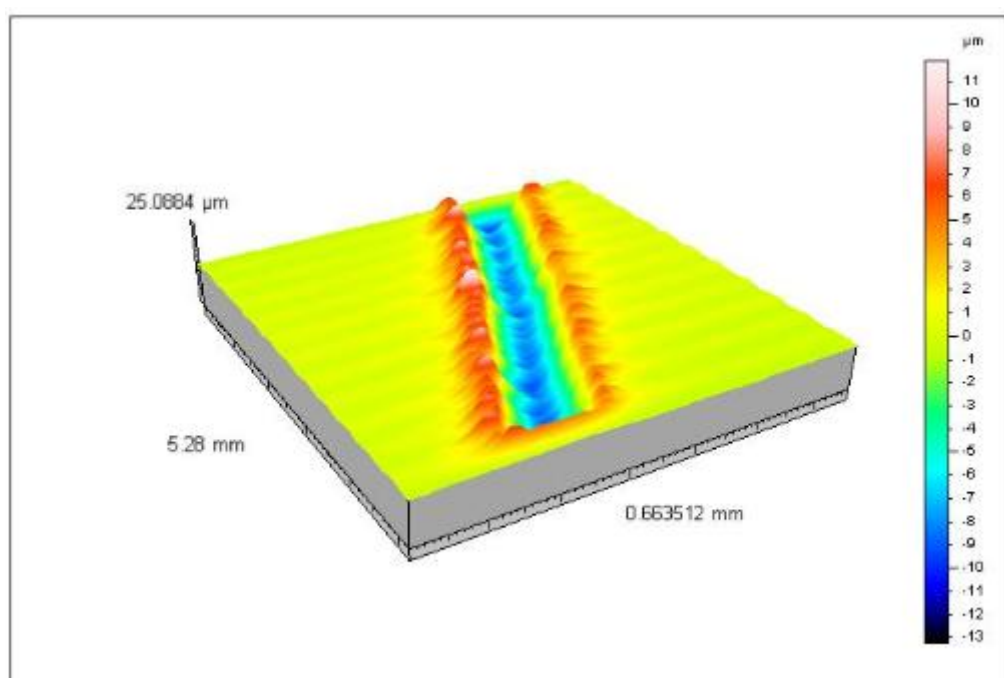


Figura A.3.8: Visão 3D do risco (S3 - 19N)

- Cementado – Carga Normal de 2N

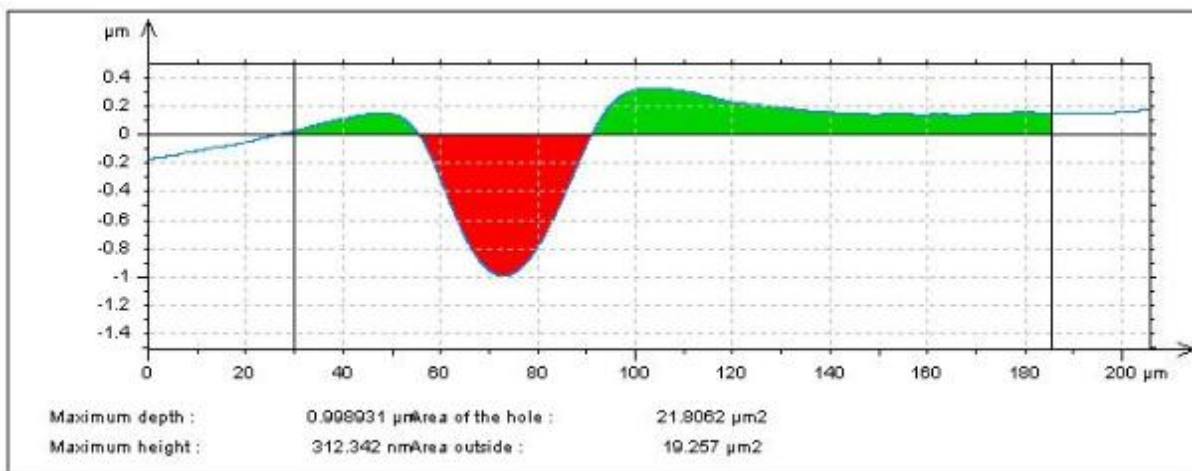


Figura A.3.9: Perfil médio e determinação das áreas de sulco e de material deslocado (S1 – 2N)

Na figura A.3.9 nota-se uma anormalidade na determinação da área de material deslocado. Isso ocorreu devido a uma marca que existia na amostra na região do risco, porém o ocorrido não interferiu de forma significativa nos resultados.

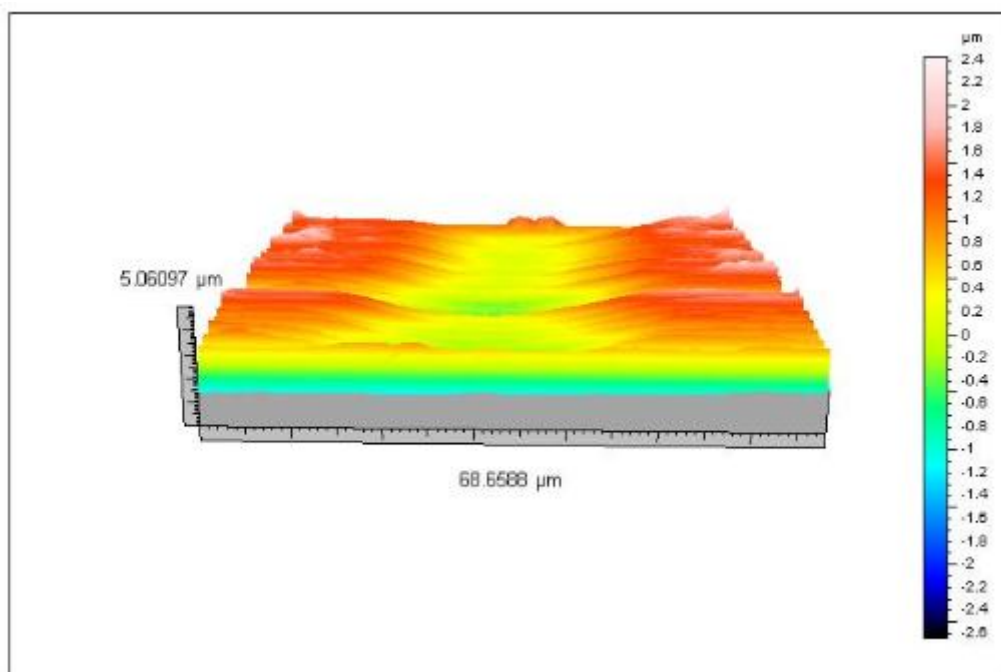


Figura A.3.10: Visão 3D do risco (S1 – 2N)

- Cementado – Carga Normal de 5N

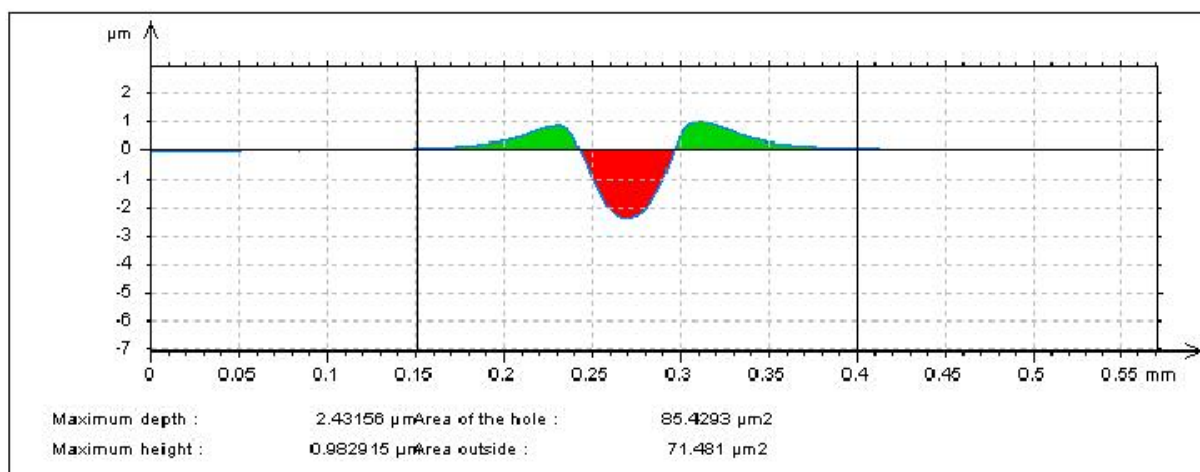


Figura A.3.11: Perfil médio e determinação das áreas de sulco e de material deslocado (S1 – 5N)

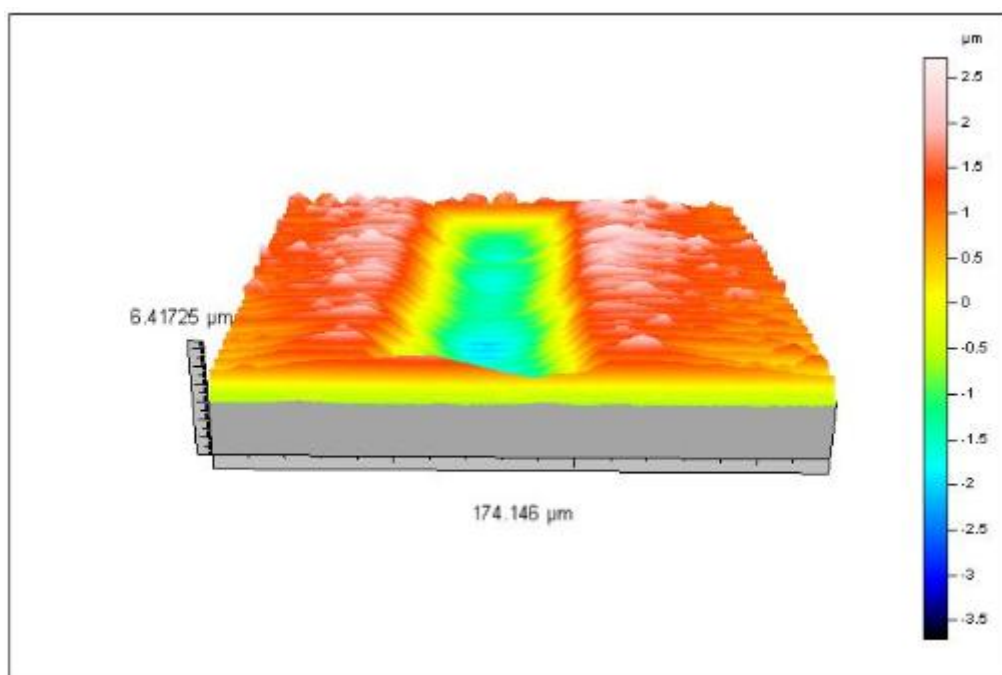


Figura A.3.12: Visão 3D do risco (S1 – 5N)

- Cementado – Carga Normal de 10N

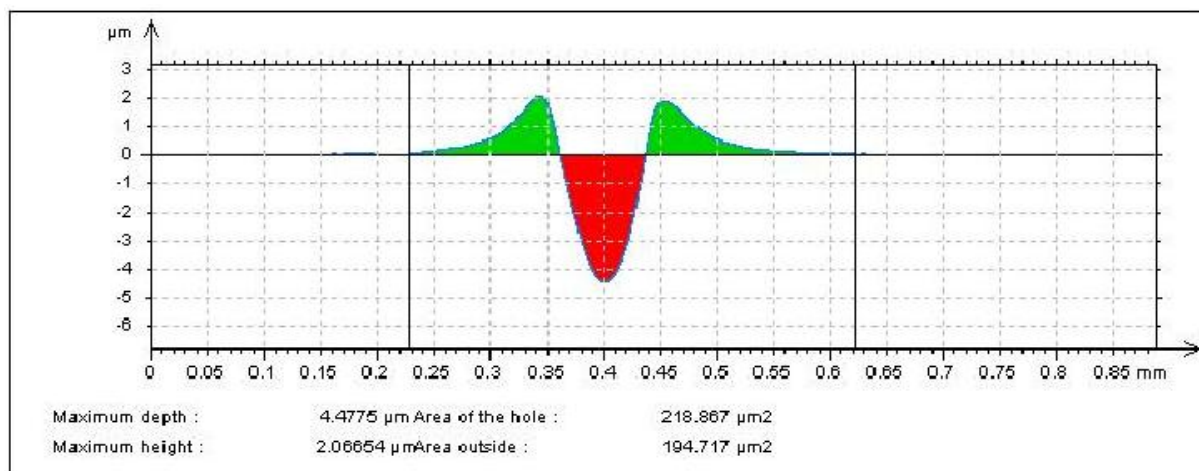


Figura A.3.13: Perfil médio e determinação das áreas de sulco e de material deslocado (S1 – 10N)

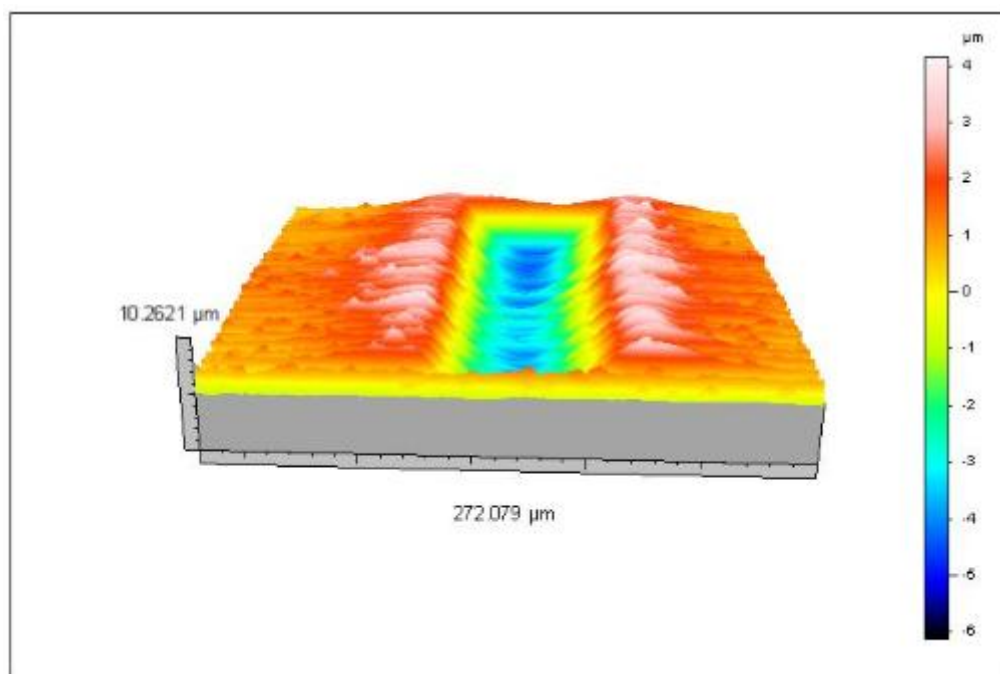


Figura A.3.14: Visão 3D do risco (S1 - 10N)

- Cementado – Carga Normal de 19N

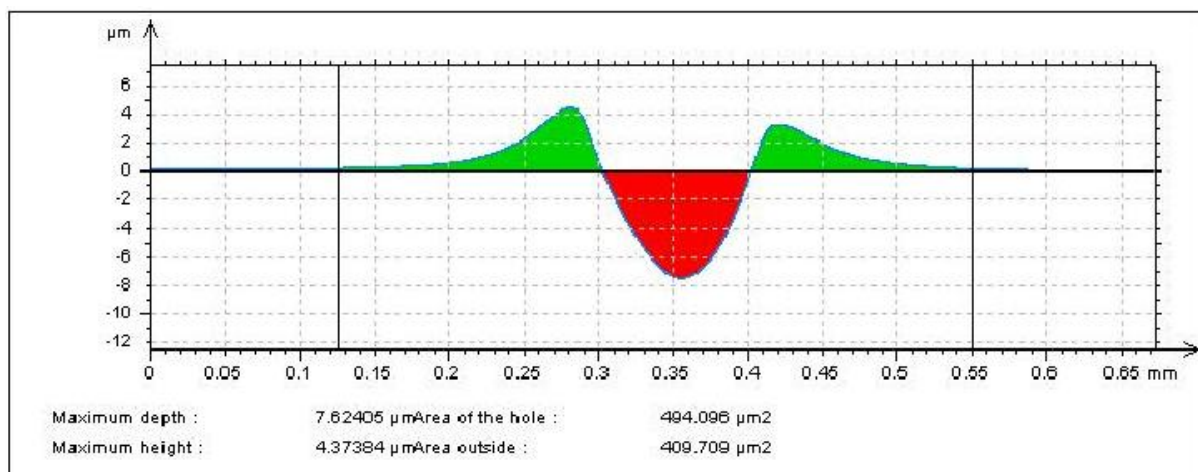


Figura A.3.15: Perfil médio e determinação das áreas de sulco e de material deslocado (S1 – 19N)

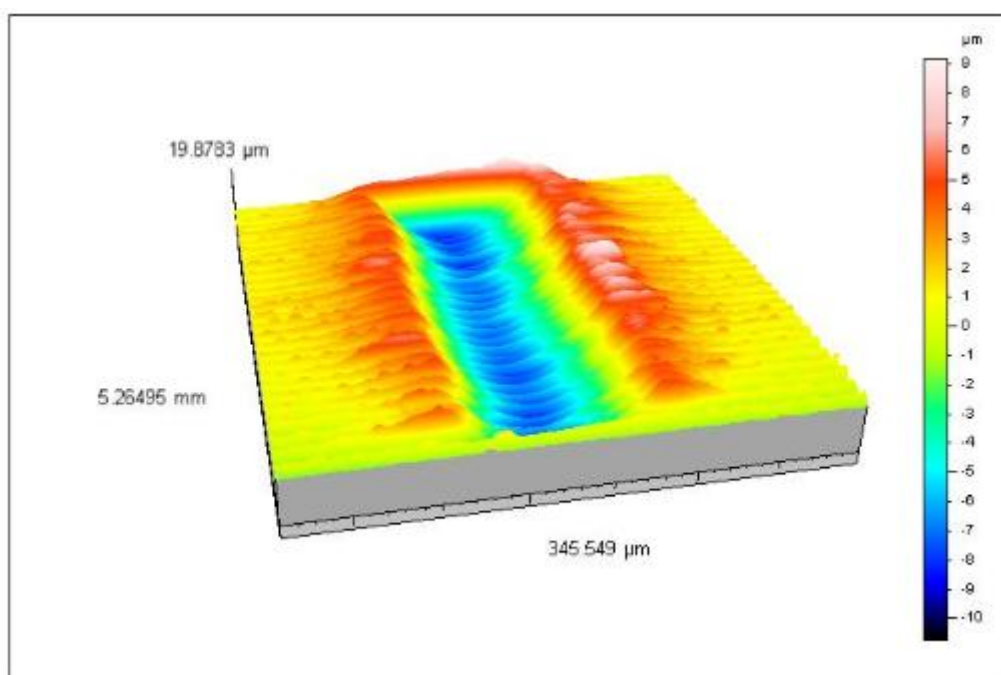


Figura A.3.16: Visão 3D do risco (S1 - 19N)

- Substrato – Carga Normal de 2N

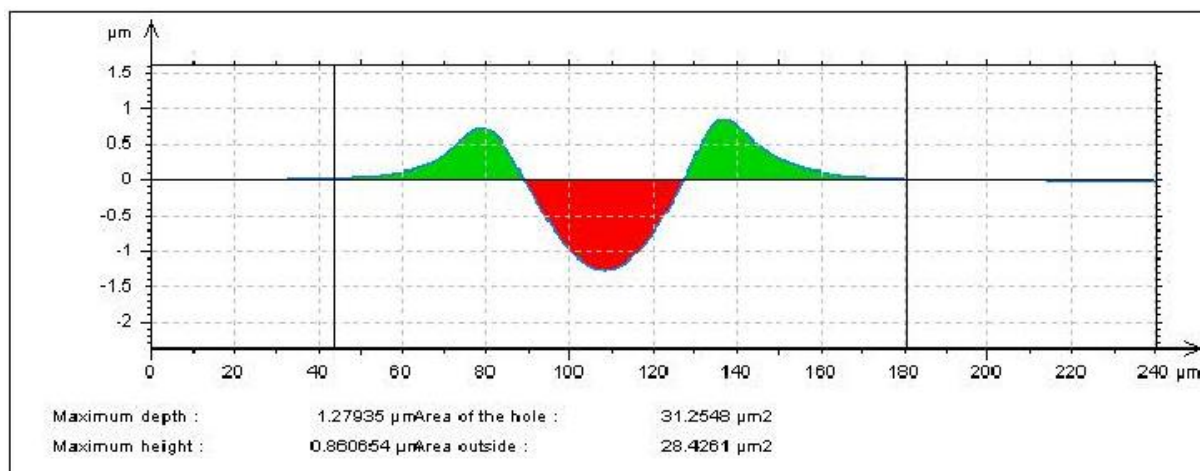


Figura A.3.17: Perfil médio e determinação das áreas de sulco e de material deslocado (S0 – 2N)

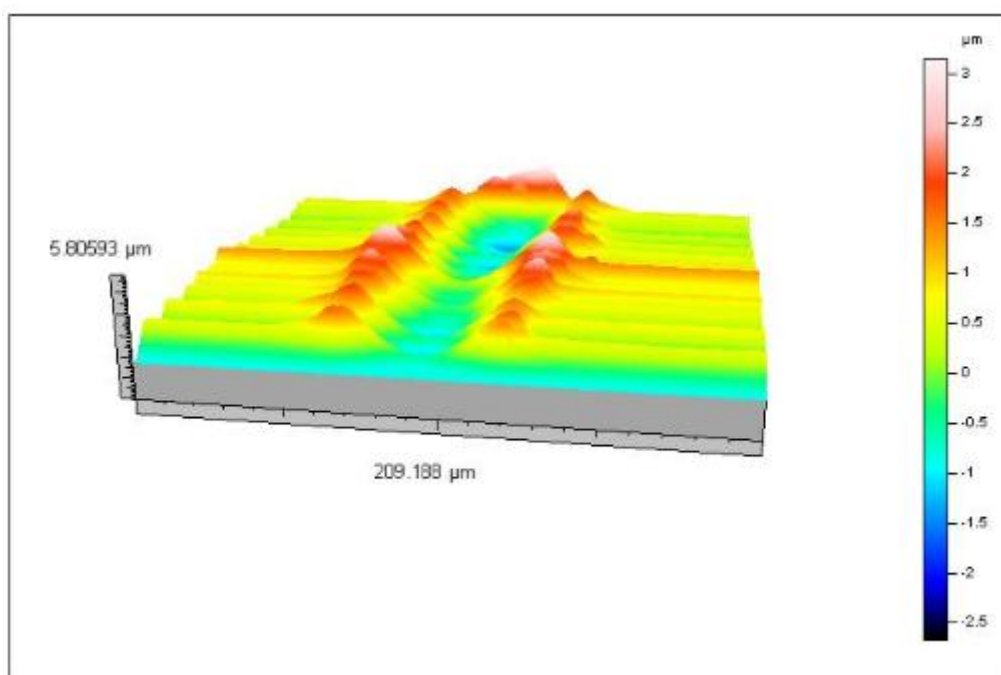


Figura A.3.18: Visão 3D do risco (S0 - 2N)

- Substrato – Carga Normal de 5N

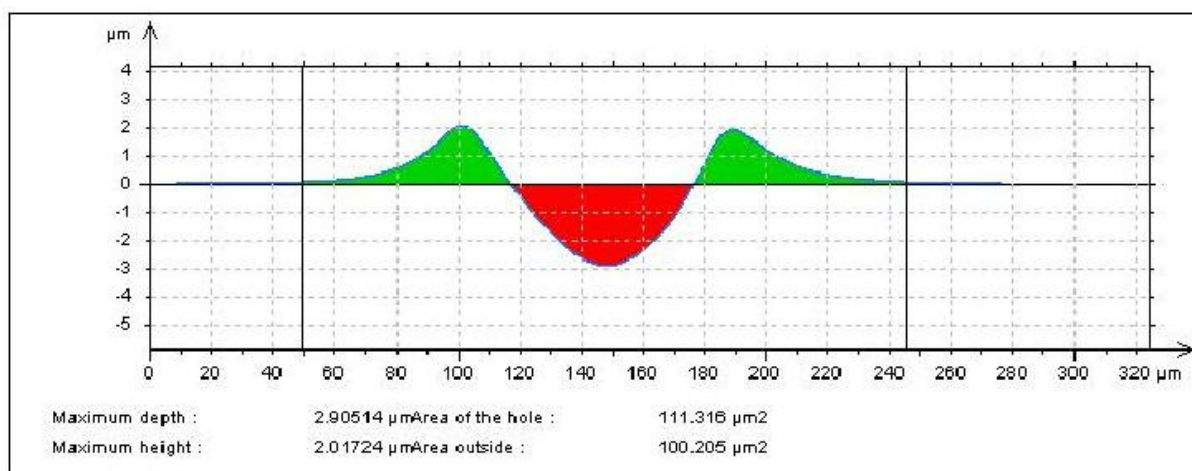


Figura A.3.19: Perfil médio e determinação das áreas de sulco e de material deslocado (S0 – 5N)

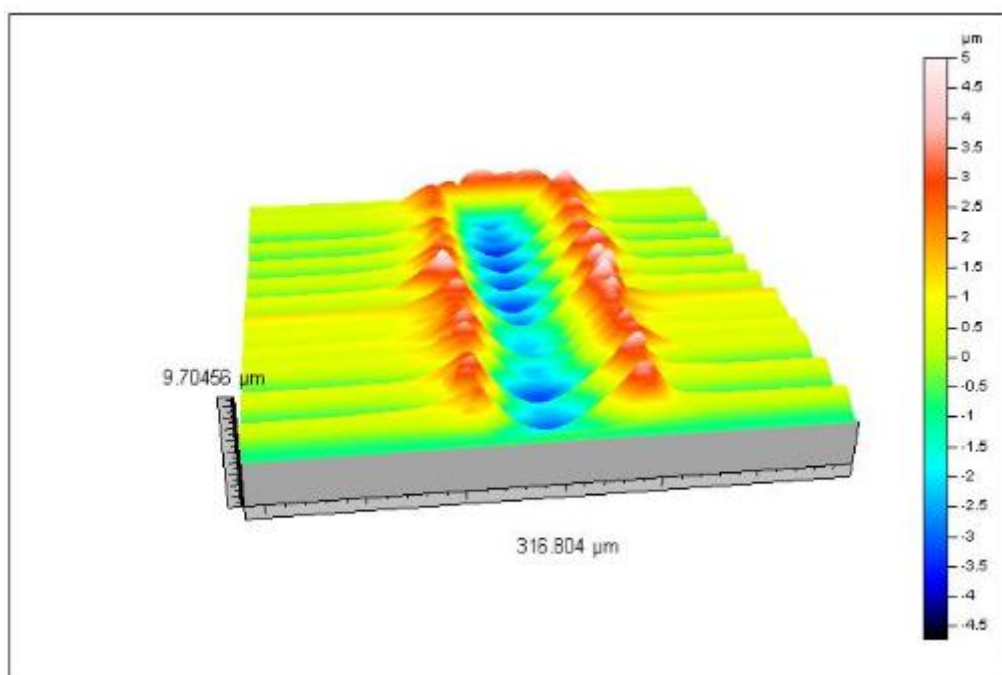


Figura A.3.20: Visão 3D do risco (S0 - 5N)

- Substrato – Carga Normal de 10N

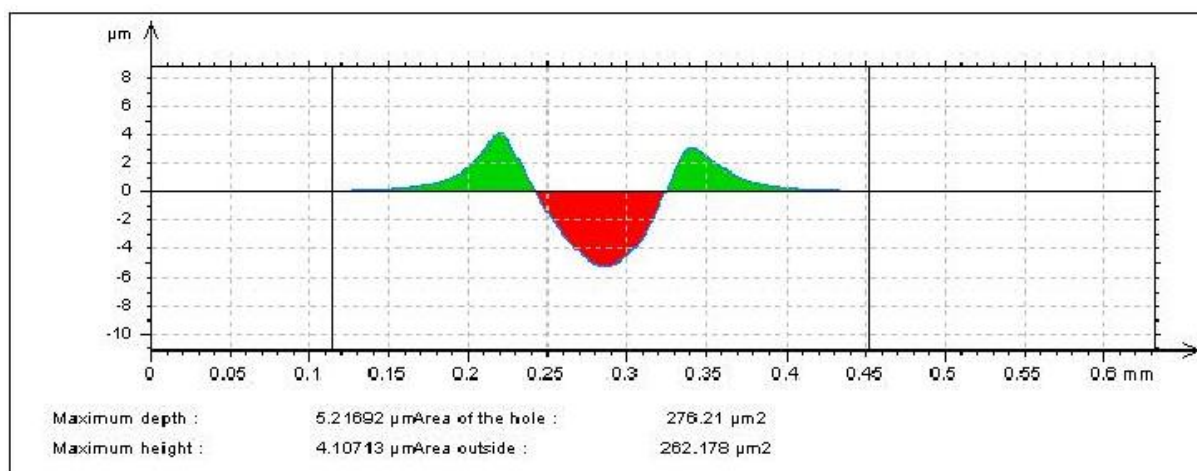


Figura A.3.21: Perfil médio e determinação das áreas de sulco e de material deslocado (S0 – 10N)

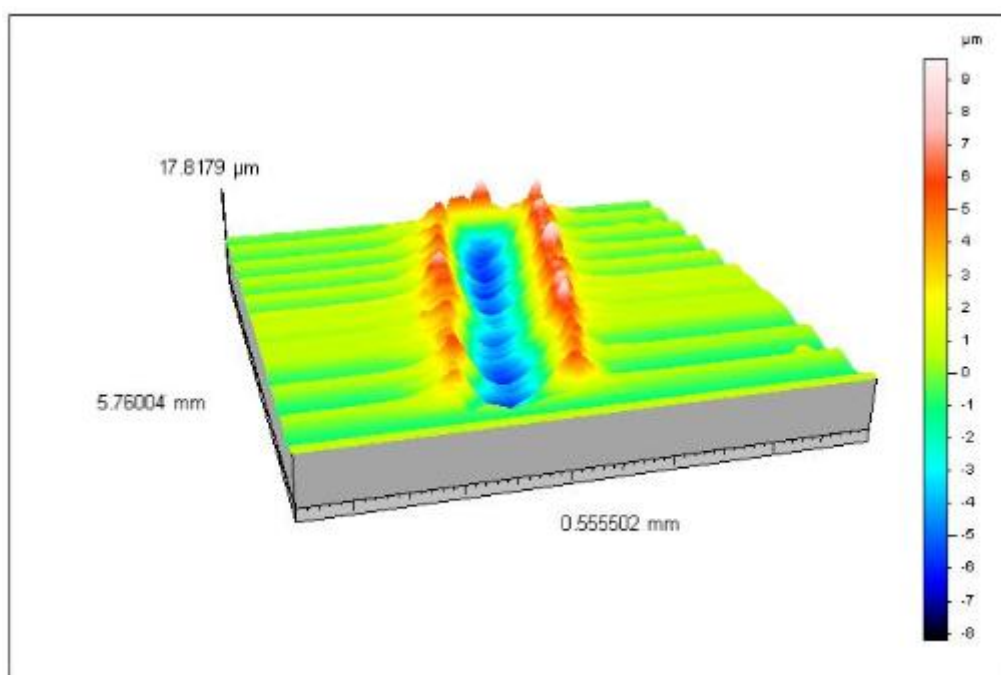


Figura A.3.22: Visão 3D do risco (S0 – 10N)

- Substrato – Carga Normal de 19N

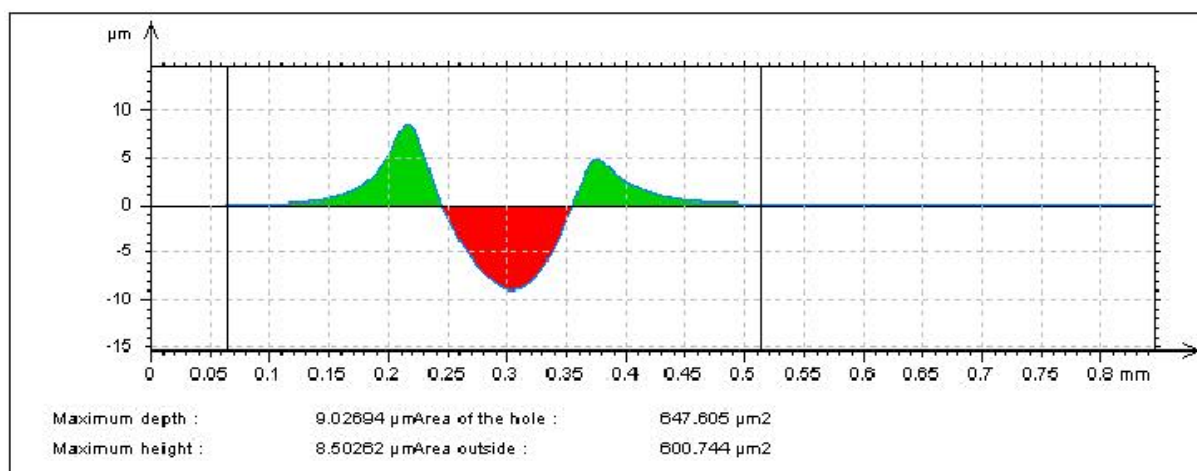


Figura A.3.23: Perfil médio e determinação das áreas de sulco e de material deslocado (S0 – 19N)

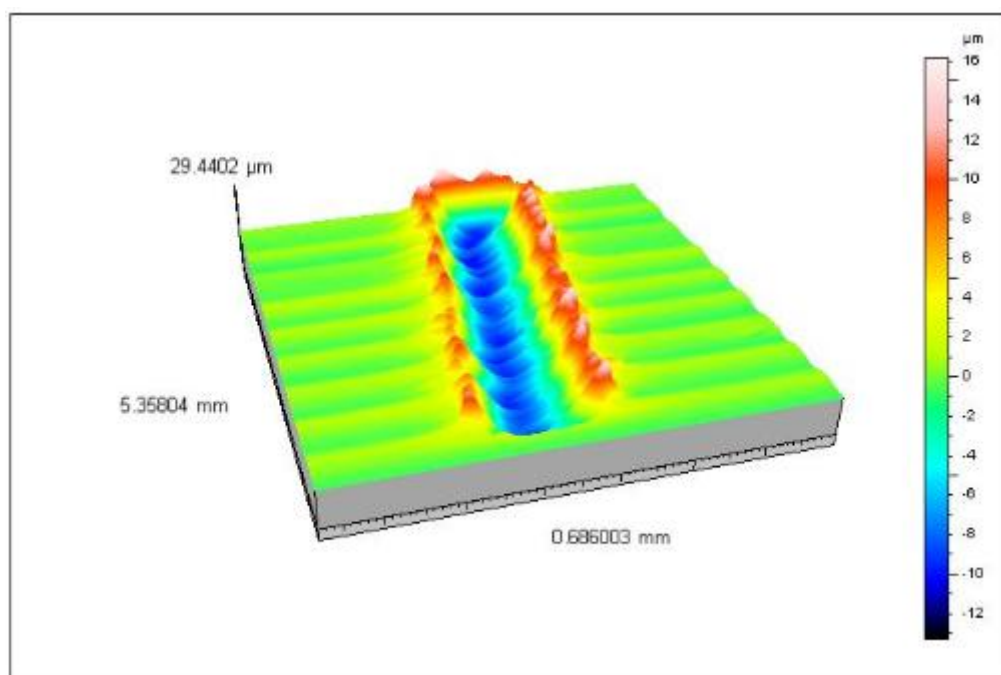


Figura A.3.24: Visão 3D do risco (S0 - 19N)

**OBS:** Em praticamente todas as representações deste anexo percebe-se que há uma ondulação nas amostras na parte exterior ao risco. Entretanto, sabe-se que as amostras são lisas e estas ondulações não representam de forma real a superfície. Elas podem ser devido à influência da temperatura nas medições, segundo algumas experiências relatadas por professores do Departamento de Engenharia Mecânica que em outros trabalhos já notaram o mesmo tipo de comportamento. Além disso, é notório que no caso da análise do sistema cimentado com carga de 2N a determinação das áreas apresenta um comportamento diferente de todos os outros. Um possível motivo seria a ocorrência dessas ondulações já que para este caso a força é mínima e consequentemente a profundidade é baixa podendo ser facilmente influenciada por qualquer perturbação na rugosidade.