

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

MATEUS AGUIAR MARTINS

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO AÇO ABNT
8550 NITRETADO A PLASMA E REVESTIDO COM CRN OU ALCRN
POR PVD ATRAVÉS DE ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA LINEAR**

VITÓRIA
2014



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO AÇO ABNT 8550 NITRETADO A PLASMA E REVESTIDO COM CRN OU ALCRN POR PVD ATRAVÉS DE ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA LINEAR

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,
D.Sc.

VITÓRIA
2014

AGUIAR MARTINS, Mateus.

Avaliação do Comportamento Tribológico do Aço ABNT 8550 Nitretado a Plasma e Revestido com CrN ou AlCrN por PVD Através de Ensaio de Esclerometria Linear – 2014. 52f.

Orientador: Antônio Cesar Bozzi

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

1. Esclerometria Linear. 2. Aço ABNT 8550. 3. Revestimentos PVD. 4. Dureza ao Risco. 5. Coeficiente f_{ab} . I. AGUIAR MARTINS, Mateus. II. Universidade Federal Do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica. III. Avaliação do Comportamento Tribológico do Aço ABNT 8550 Nitretado a Plasma e Revestido com CrN ou AlCrN por PVD Através de Ensaio de Esclerometria Linear.

MATEUS AGUIAR MARTINS

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO AÇO
ABNT 8550 NITRETADO A PLASMA E REVESTIDO COM CRN
OU ALCRN POR PVD ATRAVÉS DE ENSAIOS DE
ESCLEROMETRIA LINEAR**

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 5 de março de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. D.Sc. Antônio Cesar Bozzi
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Orientador

Prof. D.Sc.
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Examinador

Prof. D.Sc.
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Examinador

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Goreti, ao meu pai Marcial e minha irmã Ananda. Sem eles eu não teria chegado até aqui.

À Agência Nacional do Petróleo (ANP) e ao Programa de Recursos Humanos da Petrobrás (PRH29) pela oportunidade e apoio financeiro para a realização deste trabalho;

Ao Orientador D.Sc. Antônio Cesar Bozzi por toda ajuda e conselhos.

Ao Professor e amigo D.Sc. Flávio José da Silva por todo o apoio e dedicação e por nunca desanimar diante dos obstáculos.

Aos grandes amigos antigos e novos que em muito colaboraram com este trabalho, direta ou indiretamente.

RESUMO

O aço ABNT 8550 ou DIN 34CrAlNi7, é um aço pré-beneficiado para nitretação, utilizado na construção de rotores de bombas multifásicas para exploração de petróleo em águas oceânicas profundas. Neste trabalho estavam disponíveis amostras desse aço submetidas a diferentes tratamentos térmicos (recozimento ou têmpera e revenido) que foram nitretadas a plasma, retificadas para a remoção da camada branca e revestidas através da deposição de filmes PVD (*Physical Vapor Deposition*) de CrN ou AlCrN. As amostras foram analisadas através de ensaios de esclerometria linear, realizados no equipamento Universal Micro Tester modelo APEX da CETR/Bruker, os resultados foram avaliados através de perfilometria para a determinação dos valores de dureza ao risco, coeficiente de arrasto do indentador e coeficiente f_{ab} , para cada tipo de amostra nas condições de ensaio vigentes. A nitretação da amostra resultou num aumento da dureza ao risco e do coeficiente f_{ab} , demonstrando uma mudança da predominância do mecanismo de microsulcamento para o microcorte. Os revestimentos aplicados não trouxeram melhorias evidentes nos parâmetros analisados se comparados com as amostras apenas nitretadas, em alguns casos houve diminuição da dureza ao risco e aumento do f_{ab} .

Palavras-Chave: Esclerometria Linear; Aço ABNT 8550; Dureza ao Risco; Coeficiente f_{ab} ; Revestimentos PVD.

ABSTRACT

The ABNT 8550 steel or DIN 34CrAlNi7 is a special alloy for nitriding, used in the fabrication process of multiphase pump rotors for deepwater oil extraction. Samples of the ABNT 8550 steel were submitted to two different heat treatments process (annealing or quenching with tempering), these two materials were plasma nitrided, some samples were then submitted to a precision grinding process to remove the white layer. After the removal of that layer, the samples received PVD (Physical Vapor Deposition) coatings of CrN and AlCrN. The materials were analyzed in scratch tests, performed by the Universal Micro Tester mode APEX by CETR/Bruker, the results of the tests were analyzed through surface profiling to assess the scratch hardness numbers, the stylus drag coefficient and the f_{ab} coefficient for each sample and test conditions. The nitriding of the samples resulted in an increase of the scratch hardness number and the f_{ab} coefficient, showing a change of wear mechanisms from the predominance of microploughing to microcutting. The applied PVD coatings did not bring evident changes on the assessed parameters when compared with the nitrided samples only, in some cases a decrease in the scratch hardness number and an increase of the f_{ab} coefficient were observed.

Keywords: Scratch Test, ABNT 8550 Steel, Scratch Hardness, f_{ab} coefficient, PVD Coatings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bomba multifásica do tipo duplo parafuso. Fonte: (OLIVEIRA, 2003).	14
Figura 2 - Características dos tipos de desgaste em bombas do tipo parafuso. Fonte: (HÖPPEL <i>et al. apud</i> SILVA, 2008).	15
Figura 3 - Micromecanismos de desgaste. Fonte: (ZUM GAHR, 1987).	18
Figura 4 - Relação entre dureza Mohs e dureza indentada. Fonte: (WILLIAMS, 1996).	20
Figura 5 - Tipos de ensaios de esclerometria linear em equipamentos de baixa velocidade: a) passe único, b) múltiplos passes e c) trajetória circular. Fonte: (JACOBSSON <i>et al</i> , 1996).	21
Figura 6 - Esclerometria linear in situ. Fonte: (JACOBSSON <i>et al</i> , 1996).	22
Figura 7 - Equipamentos de esclerometria linear de alta velocidade, a) pêndulo e b) disco girante. Fonte: (JACOBSSON <i>et al</i> , 1996).	22
Figura 8 - Representação da área projetada pra diferentes indentadores. Fonte: (WILLIAMS, 1996).	23
Figura 9 - Coeficiente f_{ab} para um sulco teórico. Fonte: (ZUM GAHR, 1987). ..	24
Figura 10 - Microestruturas do aço ABNT 8550 a) beneficiado e b) recozido. Fonte: (SILVA, 2008).	32
Figura 11 - Perfil de microdureza Vickers do aço ABNT 8550 nitretado a plasma. Fonte: (SILVA, 2008).	33
Figura 12 - Universal Micro Tester modelo APEX da CETR/Bruker.	35
Figura 13 - Perfilômetro TalySurf CLI 1000 – 3D Surface profiling Systems do fabricante Taylor Hobson Precision.	37
Figura 14 - Topografia de um risco executado sob carga de 19 N em amostra BNR.	37
Figura 15 - Sobreposição de perfis e perfil médio para uma amostra BN riscada sob carga de 19N.	38
Figura 16 - Medida da largura de um risco em amostra BNR sob carga de 19 N.	38
Figura 17 - Determinação das áreas A_v , A_1 e A_2 de um risco em amostra BNR sob carga de 19 N.	39

Figura 18 - Gráfico de dureza ao risco para as diferentes amostras e cargas de ensaio.....	41
Figura 19 - Gráfico do coeficiente f_{ab} para as diferentes amostras e cargas de ensaio.....	43
Figura 20 - Gráfico do coeficiente de arrasto do indentador para as diferentes amostras e cargas de ensaio.	45
Figura 21 - Coeficiente de desgaste médio em ensaios de microabrasão do aço ABNT 8550. Fonte: (VIEIRA, 2014).....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 8550 (34 CrAlNi 7), análise por espectrometria de emissão óptica por centelhamento. Fonte: (SILVA, 2008)..	30
Tabela 2 - Amostras de aço ABNT 8550 disponíveis para os ensaios de esclerometria linear.	31
Tabela 3 - Propriedades dos revestimentos PVD. Fonte: (SILVA, 2008 <i>apud</i> www.balzers.com).	34
Tabela 4 - Resultados de dureza ao risco.....	40
Tabela 5 - Resultados do coeficiente f_{ab}	43
Tabela 6 - Resultados do coeficiente de arrasto do indentador (C_a).	44
Tabela 7 - Razões H_s/H_l de metais. Fonte: (WILLIAMS, 1996).	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVO.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Tribologia	17
3.2 Desgaste Abrasivo.....	17
3.3 Esclerometria Linear	19
3.3.1 Introdução	19
3.3.2 A Escala Mohs de Dureza	19
3.3.3 Classificação dos Equipamentos de Esclerometria.....	21
3.3.4 Dureza ao Risco.....	22
3.3.5 O Coeficiente f_{ab}	24
3.3.6 Coeficiente de Arrasto do Identador	25
3.3.7 Metodologia Padrão para a Determinação da Dureza ao Risco de Materiais Utilizando um Identador de Diamante.....	26
4 METODOLOGIA.....	30
4.1 Materiais Avaliados.....	30
4.1.1 Tratamentos Térmicos	32
4.1.2 Nitretação	33
4.1.3 Revestimentos PVD	34
4.2 Ensaio de Esclerometria Linear	35
4.2.1 Equipamento e Parâmetros de Ensaio.....	35
4.2.2 Análise Dos Riscos	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1 Dureza ao Risco	40
5.2 Coeficiente f_{ab}	42
5.3 Coeficiente De Arrasto Do Identador (C_a).....	44
5.4 Discussões	46
6 CONCLUSÕES	49
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

Impulsionada a partir de 1970 pelas descobertas de grandes campos em águas profundas, e devido à introdução de diversas inovações tecnológicas, a PETROBRAS se mantém como líder mundial na tecnologia de produção de petróleo em águas profundas, tendo estabelecido durante anos consecutivos, diversos recordes mundiais de profundidade na utilização de sistemas submarinos de produção de petróleo.

Com o avanço tecnológico da indústria do petróleo houve o aumento constante das profundidades de extração e reservas são descobertas em áreas cada vez mais remotas. Dessa maneira há a necessidade de reduzir custos de extração de petróleo nesses campos submarinos tornando-os cada vez mais rentáveis buscando sempre a mitigação dos riscos humanos, tecnológicos e financeiros do empreendimento (OLIVEIRA, 2003).

Grandes esforços vêm sendo empreendidos na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de exploração de petróleo em águas profundas. Uma dessas é a implantação de sistemas de bombeamento multifásico. Os maiores desafios dessa implantação é o desenvolvimento de sistemas viáveis e, para tanto, pesquisas são realizadas para o aumento da resistência mecânica e eficiência hidrodinâmica do sistema.

O sistema de bombeamento multifásico é capaz de transportar o petróleo bruto extraído dos poços, que consiste numa mistura de óleo, água, gás natural e partículas sólidas, a longas distâncias em um duto único. Esse sistema torna-se essencial para o caso de reservas de petróleo remotas, nas quais a instalação de uma plataforma nas proximidades da mesma torna-se inviável técnica ou economicamente. Há décadas o sistema vem sendo estudado como uma solução para o aumento da produtividade dos poços e a recuperação de campos que se encontram em fase de declínio de produção (MORAIS, 2013). A figura 1 ilustra um sistema de bombeamento multifásico.

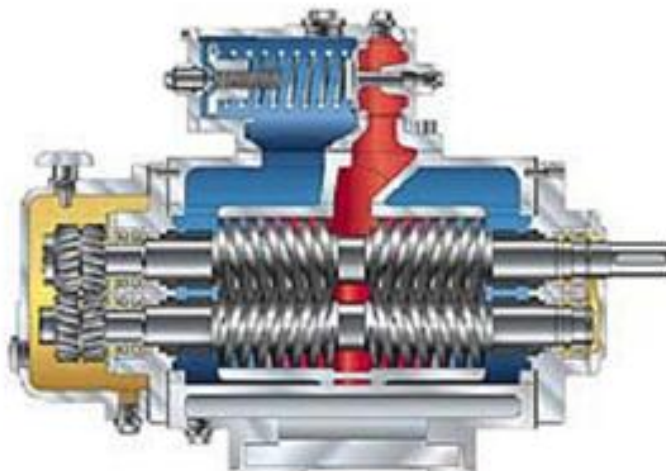


Figura 1 - Bomba multifásica do tipo duplo parafuso. Fonte: (OLIVEIRA, 2003).

Devido à grande agressividade da mistura transportada pelo sistema multifásico de bombeamento (óleo não processado, água do mar, areia, detritos, ácidos fracos, bases e gás natural liquefeito), os componentes de uma bomba multifásica, principalmente rotor e carcaça, encontram-se submetidos a grande desgaste aliado a condições agressivas de corrosão que geram uma perda da eficiência hidrodinâmica desses sistemas.

As partículas sólidas inerentes ao processo de extração do petróleo atuam nas folgas entre rotor e carcaça das bombas de parafuso em ângulos variáveis. A interação dessas partículas pode ocorrer de três maneiras diferentes, como mostra a figura 2. Partículas pequenas o suficiente para passarem entre as folgas causam abrasão ou erosão, apresentando movimento quase paralelo à superfície com a qual interagem. Partículas demasiado grandes causam erosão nos filetes do parafuso, provocando um arredondamento sensível da ponta deste (SILVA, 2008).

O desenvolvimento de materiais de elevada resistência à abrasão e à corrosão para a fabricação de rotores e carcaça de bombas multifásicas é de suma importância econômica para as empresas petrolíferas. A perda da eficiência hidrodinâmica de uma bomba em operação gera a necessidade de processos onerosos do ponto de vista financeiro, como a troca de um rotor ou a troca de

uma bomba, isso implica numa parada de produção que aumenta ainda mais os custos operacionais do sistema em questão.

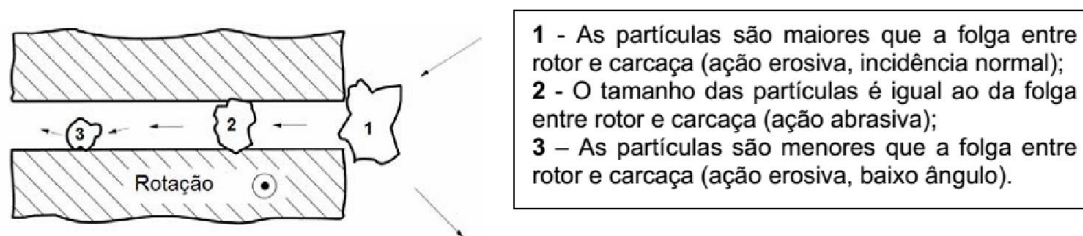


Figura 2 - Características dos tipos de desgaste em bombas do tipo parafuso. Fonte: (HÖPPEL *et al. apud* SILVA, 2008).

Atualmente, utiliza-se o aço ABNT 8550 nitretado a plasma na construção de rotores de bombas para a extração de petróleo em águas profundas. Visando a melhoria das propriedades tribológicas desse aço, é possível combinar a nitretação a um processo PVD (*Physical Vapor Deposition*), criando um conjugado dúplex que alia alta resistência mecânica e boas propriedades superficiais e que vem sendo cada vez mais utilizado em aplicações de tribologia.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo determinar o comportamento mecânico e tribológico, através de ensaios de esclerometria linear, do aço ABNT 8550 submetido a diferentes tratamentos térmicos, nitretação a plasma e revestimentos PVD. Esse ensaio simula um monoevento abrasivo através do riscamento da amostra com uma partícula de geometria e dimensões conhecidas em condições controladas de carga normal e velocidade entre outras.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tribologia

O termo Tribologia teve sua primeira aparição em 9 de maio de 1966 para definir “A ciência e tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo e práticas relacionadas com o mesmo.”

A tribologia é a ciência que estuda o desgaste, o atrito e a lubrificação como forma de minimizar estes dois últimos. Essa ciência apoia-se em conceitos da mecânica, física, química e ciência dos materiais. Dessa maneira, a tribologia não perfaz um conhecimento novo, a definição de 1966 conferiu apenas um foco, trata-se da aplicação dos conhecimentos básicos para prever o comportamento de sistemas físicos, ou seja, triboelementos utilizados em sistemas mecânicos (SINATORA, 2005).

3.2 Desgaste Abrasivo

Desgaste abrasivo é a remoção de material causada pela presença de partículas duras. Essas partículas podem estar entre ambas as superfícies em movimento relativo ou aderidas a uma dessas. Esse desgaste pode ser causado, ainda, pela presença de protuberâncias duras em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo (ZUM GAHR, 1987).

A caracterização dos mecanismos de desgaste presentes em condições de desgaste abrasivo é de suma importância para a análise das características de perda de massa de materiais submetidos a aplicações tribológicas. Esses mecanismos definem os processos de interação entre o material abrasivo ou asperidades duras e a superfície desgastada (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).

A figura 3 mostra um esquema dos micromecanismos de desgaste presentes no desgaste abrasivo.

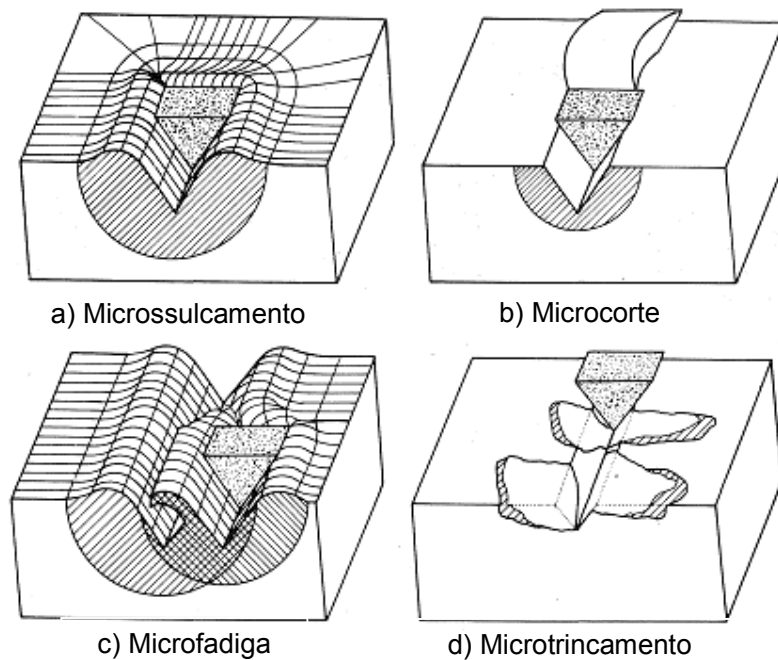


Figura 3 - Micromecanismos de desgaste. Fonte: (ZUM GAHR,1987).

A figura 3a ilustra o mecanismo de microsulcamento, no qual todo o material deslocado do sulco pela partícula abrasiva é deformado plasticamente, não havendo remoção de material.

Durante o desgaste abrasivo há uma interação entre partículas abrasivas de maneira sucessiva ou simultânea. Material pode ser deformado repetidas vezes por essas partículas abrasivas, sofrendo ruptura por fadiga de baixo ciclo, configurando o mecanismo de microfadiga, figura 3c.

Quando as condições de desgaste não permitem elevados níveis de deformação plástica do material, ocorre o mecanismo de microcorte, com consequente produção de debris (FERREIRA, 2010). O microcorte puro resulta numa perda de material igual ao volume do sulco produzido.

Microtrincamento pode ocorrer quando altas tensões concentradas são impostas ao material por partículas abrasivas. Esse mecanismo é mais comumente observado na abrasão de materiais frágeis. Nesse caso, grandes

porções da superfície se destacam em forma de debris, devido à formação e propagação de trincas (ZUM GAHR, 1987).

3.3 Esclerometria Linear

3.3.1 Introdução

O ensaio de esclerometria linear é utilizado para avaliar mecanicamente a superfície de um material através da simulação de um monoevento abrasivo. Nesse ensaio, um elemento duro (identador, por exemplo) é usado para gerar um sulco na amostra cujo material deseja-se analisar. Os resultados desse ensaio podem variar desde um sulcamento com presença apenas de deformação plástica para materiais dúcteis à geração de trincas e debris em materiais frágeis, bem como o deslocamento em amostras revestidas. Este método é tipicamente utilizado para (JACOBSSON *et al*, 1996):

- 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.

3.3.2 A Escala Mohs de Dureza

A esclerometria linear tem como embasamento teórico a primeira escala de dureza quantitativa, criada em 1822 pelo famoso mineralogista austríaco Friedrich Mohs. Mohs propôs uma escala de dez minerais em ordem crescente de dureza de tal maneira que cada mineral riscará o mineral uma escala abaixo deste, mas não riscará aquele que se encontra uma escala acima. Mohs

propôs seus dez minerais básicos de maneira que um igual intervalo de dureza existisse entre cada par de minerais em sequência na escala (MOHS, 1822 *apud* WILLIAMS 1996).

Uma vez que tanto a dureza ao risco de um material como a dureza indentada são propriedades relacionadas diretamente à capacidade de deformação de um material, é natural esperar que exista uma correlação entre a escala Mohs de dureza e a escala de dureza indentada, essa correlação de fato existe e é mostrada na figura 4 (TABOR, 1956).

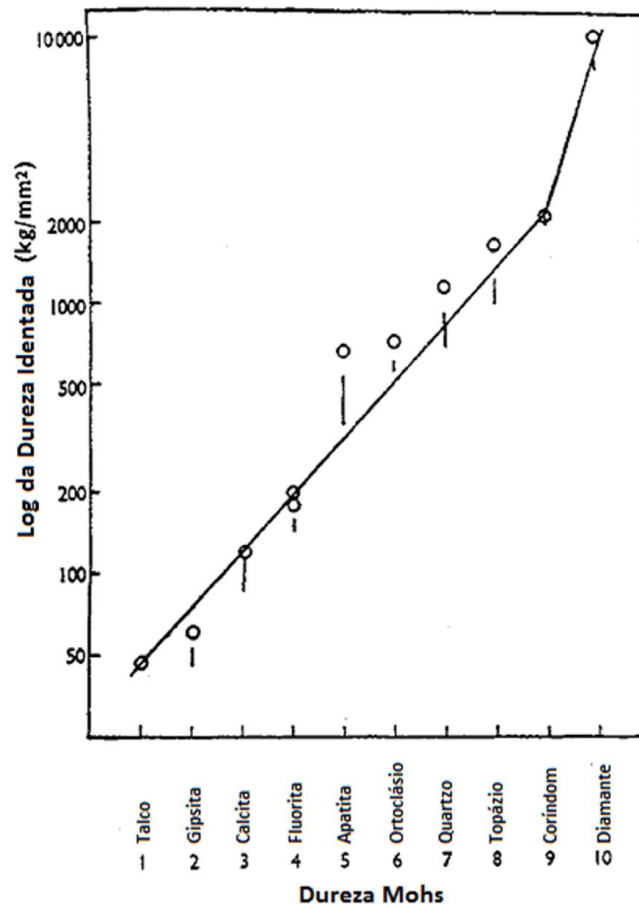


Figura 4 - Relação entre dureza Mohs e dureza indentada. Fonte: (WILLIAMS, 1996).

A inclinação da curva na figura 4 indica que a mudança de uma unidade na escala Mohs corresponde a um aumento de dureza indentada por um fator de

ordem aproximadamente 1,6, com exceção do intervalo entre coríndon (dureza 9 na escala Mohs) e diamante (10 na escala Mohs). A uniformidade dessa escala em termos de dureza identada dos 10 minerais reflete a alta qualidade do trabalho de Mohs, que tinha conhecimento, inclusive, desse aumento mais acentuado em sua escala entre as durezas 9 e 10 (BULSARA *et al*, 1996).

3.3.3 Classificação dos Equipamentos de Esclerometria

Os equipamentos utilizados em testes de esclerometria são classificados em 3 diferentes grupos:

- I. Baixa velocidade: o elemento riscante (identador) 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 5.

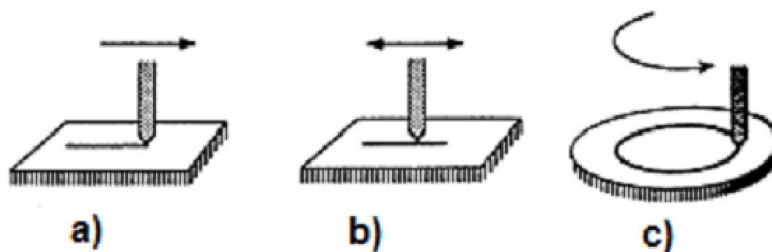


Figura 5 - Tipos de ensaios de esclerometria linear em equipamentos de baixa velocidade: a) passe único, b) múltiplos passes e c) trajetória circular. Fonte: (JACOBSSON *et al*, 1996).

- II. Baixa velocidade *in situ*: equipamentos que realizam os ensaios de esclerometria no interior de um microscópio eletrônico de varredura, utilizado em estudos mais detalhados dos mecanismos de desgaste e formação do sulco. Esse tipo de ensaio é mostrado na figura 6.

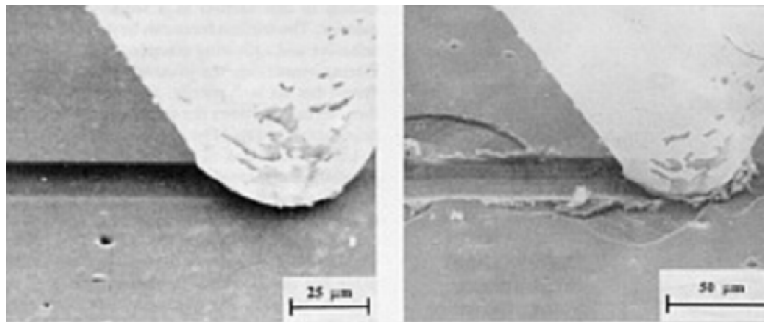


Figura 6 - Esclerometria linear in situ. Fonte: (JACOBSSON *et al*, 1996).

- III. Alta velocidade: nesta configuração tanto simples como múltiplos passes podem ser feitos. Duas formas que podem ser realizadas estão ilustradas na figura 7, elemento riscante montado em um pêndulo ou na periferia de um disco girante.

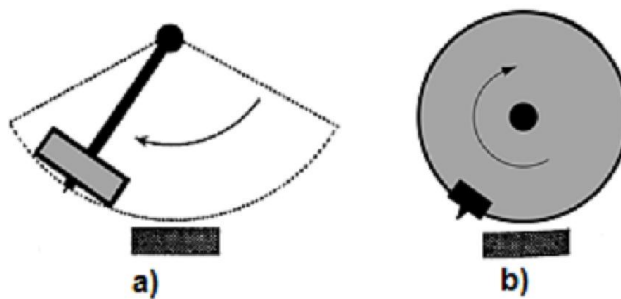


Figura 7 - Equipamentos de esclerometria linear de alta velocidade, a) pêndulo e b) disco girante. Fonte: (JACOBSSON *et al*, 1996).

3.3.4 Dureza ao Risco

A dureza ao risco (H_S) é uma análise quantitativa que caracteriza a resistência de uma superfície sólida ao sulcamento efetuado por um elemento riscante de alta dureza (identador), com raio de ponta definido, sob carga constante e que se movimenta a uma velocidade também constante (ASTM G171, 2009). A dureza ao risco é calculada segundo a expressão:

$$H_s = \frac{\text{Força Normal}}{\text{Área Projetada}}$$

(1)

Na determinação da dureza ao risco de um material, a força normal aplicada é, geralmente, de fácil aquisição, sendo na maioria dos casos exercida por meio de peso morto ou um sistema automático de aplicação e controle desta. A determinação da área projetada, porém, mostra-se mais complexa. Essa área é estimada através do sulco resultante de um ensaio e da geometria do elemento riscante, assumindo-se algumas hipóteses sobre a área de contato indentador-material. A primeira hipótese assume que o contato ocorre apenas na face frontal do indentador. Uma segunda hipótese considera que os efeitos elásticos são muito pequenos, de maneira que a largura de contato durante o sulcamento é igual à largura do sulco após a realização do ensaio (WREDENGERG e LARSSON, 2009). Dessa maneira, pode-se determinar a área projetada (A_{LB}) como mostrado na figura 8.

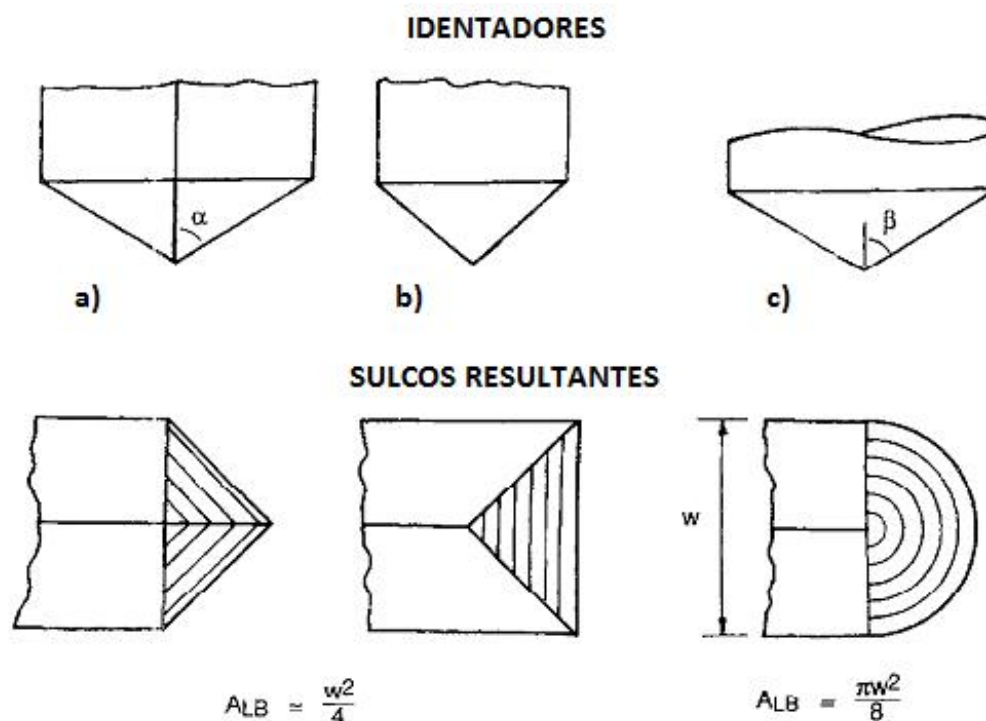


Figura 8 - Representação da área projetada pra diferentes indentadores. Fonte: (WILLIAMS, 1996).

3.3.5 O Coeficiente f_{ab}

No desgaste abrasivo de um material, é conhecido que apenas uma fração do sulco formado por uma partícula abrasiva é removida como desgaste, a fração restante é movimentada através de deformação plástica, formando bordas nas laterais de um sulco e deslocando material em forma de proa à frente dessa partícula (STROUD e WILLMAN, 1962).

Em um experimento de esclerometria linear, a relação entre volume de material removido por desgaste e volume do sulco gerado pode ser descrito por uma fração " f_{ab} ", expressa pela equação:

$$f_{ab} = \frac{A_v - (A_1 + A_2)}{A_v} \quad (2)$$

Onde,

A_v = área transversal do sulco gerado

$(A_1 + A_2)$ = áreas de material deslocado para as bordas do sulco

A figura 9 mostra um esquema representativo do coeficiente f_{ab} para um sulco teórico.

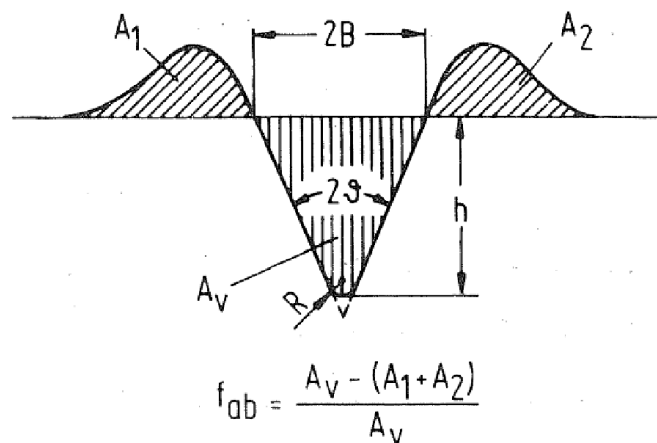


Figura 9 - Coeficiente f_{ab} para um sulco teórico. Fonte: (ZUM GAHR, 1987).

O coeficiente f_{ab} pode ser relacionado diretamente com os mecanismos de desgaste apresentados, de maneira que, para $f_{ab} = 0$, há a presença de microsulcamento puro. Para $f_{ab} = 1$, o mecanismo encontrado será o microcorte puro. Valores de $f_{ab} > 1$ são encontrados apenas em ensaios de esclerometria em materiais frágeis, com a predominância do mecanismo de microtrincamento, grandes fragmentos de desgaste são removidos da superfície devido à formação e propagação de trincas.

3.3.6 Coeficiente de Arrasto do Identador

Durante o sulcamento, a presença de forças de deformação atuantes tanto paralelamente como perpendicularmente à interface entre identador e material sendo sulcado devem ser determinadas.

A força que se opõe ao movimento relativo entre o identador e a superfície do material sendo ensaiado é chamada “força de riscamento” (*scratching force*), essa força é perpendicular à força normal aplicada pelo elemento riscante (ASTM G171, 2009).

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

$$C_a = \frac{F_r}{F_N} \quad (3)$$

O coeficiente de arrasto do identador é similar por definição, ao coeficiente de atrito por deslizamento. Esse coeficiente se refere especificamente à resistência que a superfície riscada oferece ao deslocamento de material realizado pelo penetrador de formato específico.

3.3.7 Metodologia Padrão para a Determinação da Dureza ao Risco de Materiais Utilizando um Identador de Diamante

A norma ASTM G171-03 descreve procedimentos laboratoriais para a determinação da dureza ao risco de superfícies de materiais sólidos. Com certas limitações este procedimento é aplicável a metais, cerâmicas, polímeros e superfícies revestidas. A metodologia a seguir é utilizável especificamente para identadores cônicos com ponta hemisférica.

3.3.7.1 Sumário da Metodologia

- Este ensaio envolve a produção de um sulco numa superfície sólida a partir da movimentação de um identador de diamante de geometria específica ao longo de um caminho específico sob carga e velocidade constantes. A largura média do sulco é medida e esse valor é usado para calcular o número de dureza ao risco em unidades de pressão.
- A força de riscamento pode ser medida durante o ensaio e utilizada para calcular o coeficiente de arrasto do identador.
- Este ensaio é geralmente conduzido na ausência de lubrificação à temperatura ambiente. Esta metodologia permite, porém, que ensaios sejam realizados sob lubrificação e altas temperaturas, desde que os requerimentos para validação do ensaio sejam atendidos e que as condições de teste sejam cuidadosamente descritas.
- Efeitos da umidade do ar entre outras condições atmosféricas do ambiente podem afetar os resultados do ensaio dependendo da sensibilidade do material àquele ambiente. Se tais efeitos forem observados, precauções devem ser tomadas para o controle da atmosfera e as condições desta devem ser descritas.

3.3.7.2 Aparato Experimental

Numa descrição geral, o aparato utilizado num ensaio de esclerometria linear consiste em:

- Para este procedimento de ensaio é necessário que o identador seja cônico, com ângulo de ponta de $120^\circ (\pm 5^\circ)$, e o cone deve terminar numa ponta hemisférica de $200 \mu\text{m} (\pm 10 \mu\text{m})$ de raio. O material do identador deve ser diamante.
- Um porta amostra para o material a ser ensaiado;
- Meios de aplicar a carga normal enquanto o identador move-se ao longo da trajetória definida a velocidade constante (célula de carga capaz de medir força normal e força de riscamento);
- Meios de medição da largura do sulco resultante;

Todo o aparato deve estar dentro das especificações e devidamente calibrado.

3.3.7.3 Procedimento Experimental

- Preparo da Amostra:** A superfície da amostra deve ser polida para facilitar medição e observação da largura do risco. A rugosidade da superfície a ser analisada deve ser de, pelo menos, uma ordem de grandeza menor que a profundidade do risco.
- Limpeza da Amostra:** Não existe um procedimento de limpeza geral, as amostras devem ser limpas para livrá-las de qualquer tipo de contaminação como poeira, digitais, graxa, oleosidade e etc.
- Inspecção do Penetrador:** Inspecionar o elemento através de microscópio óptico ou mesmo através de perfis topográficos para certificar-se que não haja defeitos (trincas, cavacos), desgaste ou material residual aderido resultante dos processos de fabricação do elemento ou mesmo de testes

anteriores. Limpar o penetrador com algodão ou um pano limpo umedecido com acetona ou outro solvente de limpeza é usualmente adequado.

É importante lembrar que a presença de substâncias oleosas no indentador tem efeito lubrificante, reduzindo a largura do risco resultante e aumentando o valor da dureza ao risco. Material aderido pode aumentar a força de riscamento e formar estrias na extensão do risco, em outras palavras, a não inspeção do elemento que fará o risco pode gerar artefatos e resultar numa análise errônea do teste.

- d) **Força Normal:** A força normal deve ser tal que gere um sulco mensurável, mas não deve ser grande a ponto de gerar fratura, delaminação, fragmentação ou outro tipo de defeito superficial grosseiro. Uma série de riscos com cargas variadas podem ser utilizados para avaliar a resistência do material de teste ao aumento de tensões localizadas.
- e) **Tamanho e Forma do Risco:** O tamanho do risco deve ser, no mínimo, 5mm. Esses riscos não são necessariamente lineares, eles podem ter forma de arco. Para evitar efeitos associados às bordas e ao início e fim do risco, o tamanho do risco deve ser, também, maior que 20 vezes a largura ou a profundidade do mesmo, deve-se escolher o maior desses dois parâmetros e multiplicá-lo por 20.
- f) **Velocidade de Riscamento:** A velocidade deve ser constante durante todo o teste. E deve variar entre 0.2 e 5 mm/s.
- g) **Conduzindo o Teste:** O teste deve ter no mínimo 3 riscos paralelos e separados de uma distância equivalente a no mínimo 5 vezes a largura do risco anterior.
- h) **Medindo a Largura:** Utilizando um microscópio óptico de medida ou um perfilômetro, mede-se a largura de cada risco em 3 locais diferentes separados igualmente na extensão do risco. Devido a efeitos de aceleração e desaceleração, as extremidades dos riscos não devem ser incluídas nessas medidas.

O critério principal de determinação da dureza ao risco envolve a medição de um risco executado na superfície testada, sem que esta tenha sofrido fratura catastrófica, fragmentação e ejeção de material devido a impacto ou pressão ou delaminação excessiva na superfície.

3.3.7.4 Cálculos

Devido às características geométricas do indentador cônico utilizado nesta análise, a área de contado projetada (A_{LB}) é dada pela equação (4).

$$A_{LB} = \frac{\pi \times w^2}{8} \quad (4)$$

Onde, “w” é a largura do sulco.

Aplicando esta área à equação (1), é possível representar a dureza ao risco para um indentador cônico em função da largura do sulco gerado pelo ensaio, equação (5).

$$H_S = \frac{8 \times F_N}{\pi \times w^2} \quad (5)$$

Onde “ H_S ” é a dureza ao risco, “ F_N ” é a força normal aplicada e “w” é a largura do sulco.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo será feito um apanhado sobre todo o procedimento experimental utilizado na execução dos ensaios de esclerometria linear bem como uma descrição mais aprofundada do material avaliado.

4.1 Materiais Avaliados

As análises presentes neste trabalho foram feitas em amostras de aço ABNT 8550 (34 CrAlNi 7), da classe “Nitr alloy”, de composição típica apresentada na tabela 1. Esse tipo de aço é especificamente designado para o processo de endurecimento através de nitretação, devido à presença de elementos de liga formadores de nitretos como o alumínio, o cromo e o molibdênio.

Tabela 1 - Composição química típica do aço ABNT 8550 (34 CrAlNi 7). Fonte: (SILVA, 2008).

C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al
0,300 a 0,370	< 0,035	< 0,025	0,400 a 0,700	< 0,400	1,500 a 1,800	0,850 a 1,150	0,150 a 0,250	0,800 a 1,200

Foram produzidos 10 tipos de amostras do aço ABNT 8550 conforme tabela 2. Dois tipos de tratamentos térmicos foram utilizados, beneficiamento (têmpera seguida de revenimento) e recozimento.

Parte das amostras tratadas termicamente foi nitretada a plasma obtendo-se amostras beneficiadas/nitretadas e amostras recozidas/nitretadas. O objetivo foi avaliar o efeito da nitretação para as diferentes microestruturas. As amostras nitretadas têm, como característica estrutural, uma camada de compostos ou camada branca formada na superfície, constituída essencialmente por nitretos de ferro (γ' -Fe₄N e/ou ϵ -Fe₂₋₃N). Abaixo da camada branca encontra-se a zona de difusão, que apresenta nitrogênio intersticial ou formando precipitados de nitretos. Para avaliar o efeito da

camada branca e da zona de difusão separadamente nas análises realizadas, em parte das amostras a camada branca foi eliminada por retífica de precisão.

Em parte das amostras nitretadas foi feita a deposição de revestimentos PVD (*Physical Vapour Deposition*) para avaliar as características mecânicas e tribológicas de dois tipos de conjugados dúplex. Os revestimentos utilizados foram: CrN e AlCrN. Estes são revestimentos comercialmente disponíveis e utilizados em diversas aplicações de engenharia devido às suas boas propriedades: alta dureza, tenacidade, resistência ao desgaste por deslizamento e resistência à oxidação (SILVA, 2008).

Tabela 2 - Amostras de aço ABNT 8550 disponíveis para os ensaios de esclerometria linear.

Beneficiada	B	Recozida	R
Beneficiada Nitretada	BN	Recozida Nitretada	RN
Beneficiada Nitretada e Retificada	BNR	Recozida Nitretada e Retificada	RNR
Beneficiada Nitretada Retificada e Revestida por CrN	BN(CrN)	Recozida Nitretada Retificada e Revestida por CrN	RN(CrN)
Beneficiada Nitretada Retificada e Revestida por AlCrN	BN(AlCrN)	Recozida Nitretada Retificada e Revestida por AlCrN	RN(AlCrN)

Todo o estudo das características mecânicas e microestruturais das amostras utilizadas neste trabalho foram feitas por Silva (2008). Os detalhes dos tratamentos térmicos, nitretação e revestimentos PVD são descritos a seguir.

4.1.1 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos de beneficiamento e recozimento foram executados como descrito abaixo:

Beneficiamento: Têmpera realizada mediante austenitização a 890°C por 1 hora, seguida de resfriamento em óleo. As amostras foram revenidas a 640°C por 1 hora. As amostras beneficiadas possuem uma microestrutura martensítica revenida, com dureza média de 308 HV30;

Recozimento: Recozimento a 890°C durante 1 hora e resfriamento dentro do forno durante 12 horas, até 530°C. As amostras recozidas apresentam microestrutura ferrítica-perlítica, com dureza média de 188 HV30.

A figura 10 mostra as microestruturas do aço ABNT 8550 após os tratamentos térmicos.

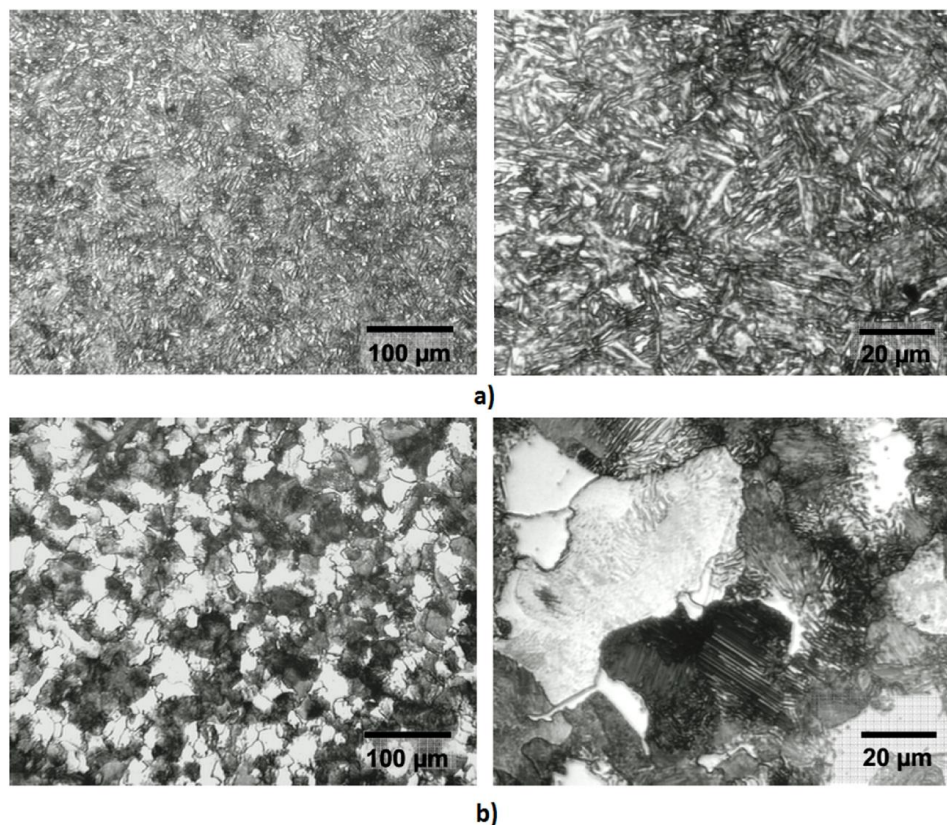


Figura 10 - Microestruturas do aço ABNT 8550 a) beneficiado e b) recozido. Fonte: (SILVA, 2008).

4.1.2 Nitretação

Os parâmetros utilizados na nitretação das amostras do aço ABNT 8550 tratado termicamente foram selecionados de maneira a produzir a maior zona de difusão possível, essa característica implica também numa maior camada de compostos. Para tanto, a nitretação a plasma foi realizada em mistura gasosa de 76% de N_2 , 24% de H_2 (% em volume) durante 9 horas a uma temperatura única de 550 °C.

As amostras obtidas após a nitretação apresentam camada branca e zona de difusão. A dureza média após a nitretação foi de 1100 HV0,05, independentemente do tipo de tratamento térmico.

Após o tratamento de nitretação foram medidas as espessuras da zona de difusão e da camada de compostos (camada branca). A camada nitretada (camada branca e zona de difusão) teve uma espessura média de 350 μm para ambos os tratamentos térmicos. A espessura da camada branca produzida foi próxima de 30 μm . A figura 11 mostra o perfil de dureza realizado nessas amostras.

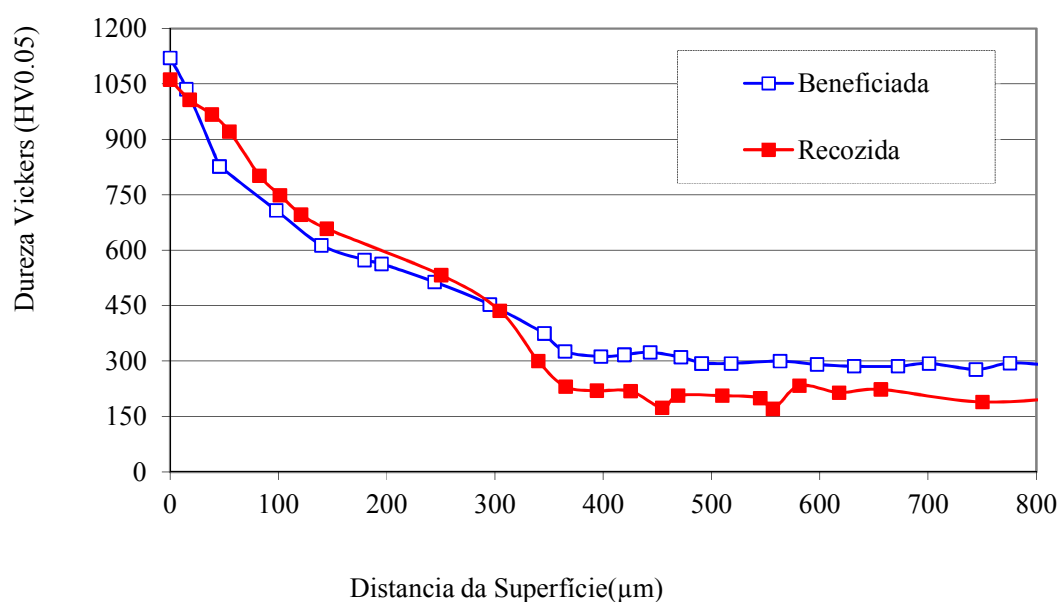


Figura 11 - Perfil de microdureza Vickers do aço ABNT 8550 nitretado a plasma.
Fonte: (SILVA, 2008).

4.1.3 Revestimentos PVD

Para a deposição dos dois tipos de revestimentos foi necessária a retirada prévia da camada de compostos formada durante a nitretação. Os revestimentos de CrN e AlCrN utilizados neste trabalho foram depositados segundo os parâmetros comerciais da técnica de PVD, que envolve a atomização ou a vaporização de um material a partir de uma fonte sólida e a sua deposição em um substrato. A tabela 3 apresenta algumas propriedades dos revestimentos depositados segundo o fabricante (Balzers).

Tabela 3 - Propriedades dos revestimentos PVD. Fonte: (SILVA, 2008 *apud* www.balzers.com).

Revestimentos	CrN (Balinit® D)	AlCrN (Balinit® Alcrona)
Microdureza (HV0,05)	1750	3200
Temperatura Máxima de Serviço (°C)	700	1100
Tensão Interna da Camada (Gpa)	-1,5 / -2	-3

A dureza do conjugado dúplex foi de aproximadamente 1900 HV0,05 e 2050 HV0,05 para os revestimentos de CrN e AlCrN respectivamente. A espessura desses revestimentos é de, em média, $4,1 \pm 0,1 \mu\text{m}$ e $3,9 \pm 0,1 \mu\text{m}$ para CrN e AlCrN respectivamente.

4.2 Ensaios de Esclerometria Linear

4.2.1 Equipamento e Parâmetros de Ensaio

Os ensaios de esclerometria linear foram realizados no equipamento Universal Micro Tester modelo APEX da CETR/Bruker, classificado como um equipamento de baixa velocidade (Figura 12).

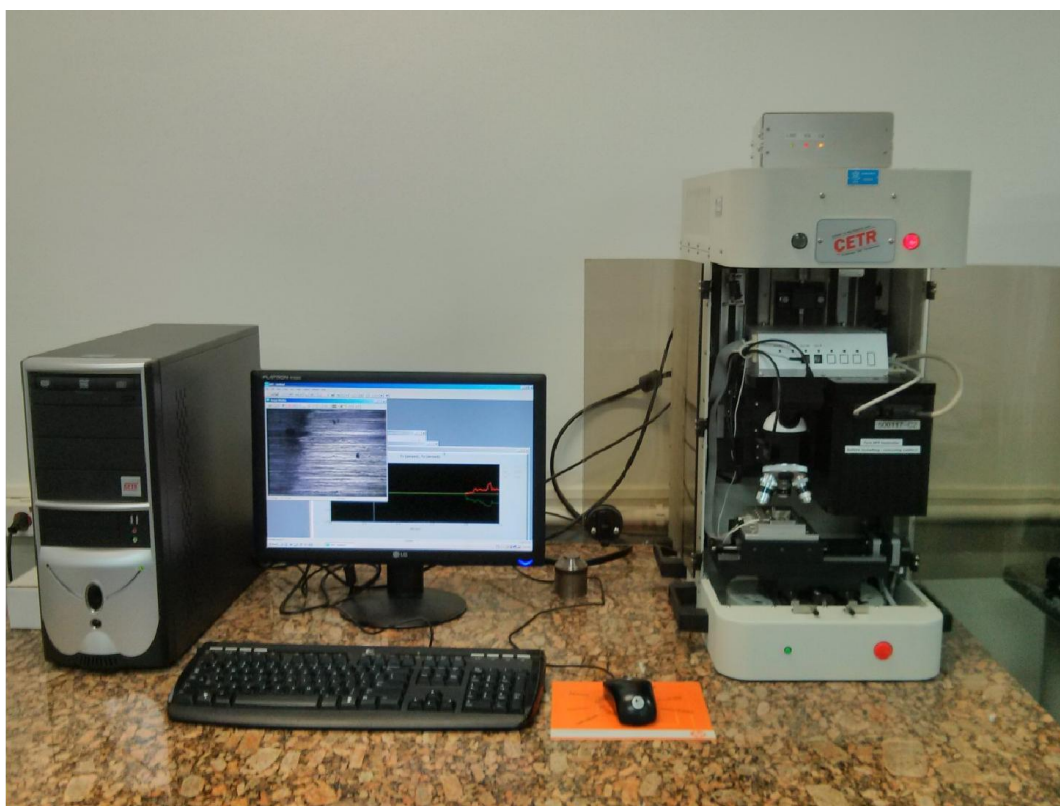


Figura 12 - Universal Micro Tester modelo APEX da CETR/Bruker.

Utilizou-se um identador de diamante esférico-cônico Rockwell C (200 μm de raio de ponta e ângulo de ponta de 120°). Antes da realização dos ensaios, a célula de carga foi calibrada e testes de microdureza Vickers com carga de 1000g foram realizados em um bloco padrão de dureza, os resultados obtidos concordaram com o valor de dureza desse padrão, garantindo a boa reprodutibilidade da medição de carga efetuada pela célula de carga. Os riscos

foram executados utilizando-se a norma ASTM G 171 como diretriz para a escolha dos parâmetros de ensaio e análise, a preparação das amostras e do indentador foram feitas também de acordo com esta norma. Em cada amostra foram feitos 3 riscos com cargas constantes de 5 N, 12 N e 19 N a uma velocidade de 0,2 mm/s. O comprimento de cada risco foi de 5mm (com espaçamento de 1 mm entre si).

4.2.2 Análise Dos Riscos

Para o cálculo da dureza ao risco das amostras é necessário medir a largura dos riscos executados. Em trabalho anterior (MARTINS, 2013), um estudo foi feito sobre dois diferentes métodos de medição da largura do risco realizado em um ensaio de esclerometria linear, são eles: microscopia óptica e perfilometria. Nesse estudo foi observada a grande dificuldade de determinar a largura média do risco em algumas situações. A baixa profundidade de foco do microscópio óptico torna difícil a visualização das bordas do risco em amostras de alta dureza ou em cargas baixas. Já na perfilometria, devido à pequena amostragem de medidas para a realização da média (4 perfis), muitos desses perfis apresentam defeitos nas bordas advindos da própria superfície da amostra, dificultando a determinação da largura. Tendo em vista esses resultados, no presente trabalho uma nova metodologia de medida da largura será adotada a fim de gerar um resultado mais refinado.

As amostras riscadas foram levadas ao perfilometro TalySurf CLI 1000 – 3D Surface Profiling Systems do fabricante Taylor Hobson Precision (Figura 13), e uma topografia de cada risco foi realizada, como mostra a figura 14. A partir dessas topografias, para cada risco foi feita a sobreposição de 25 seções transversais (região cinza sombreada), gerando uma seção transversal média (perfil representado na cor preta) semelhante à figura 15. Essa análise foi repetida 4 vezes para cada risco em posições diferentes, excluindo-se as extremidades deste.

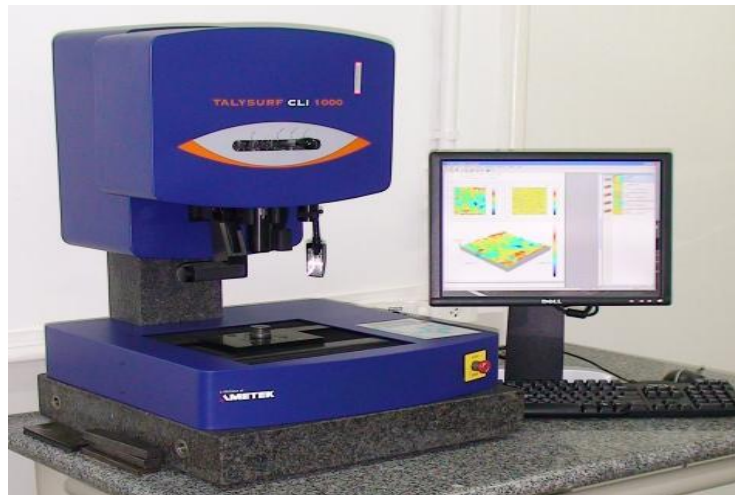


Figura 13 - Perfilômetro TalySurf CLI 1000 – 3D Surface profiling Systems do fabricante Taylor Hobson Precision.

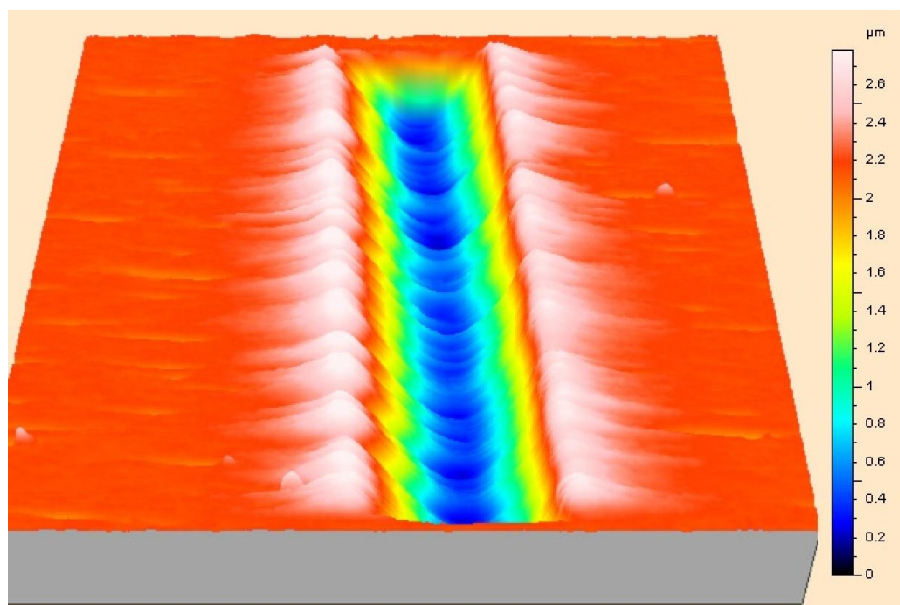


Figura 14 - Topografia de um risco executado sob carga de 19 N em amostra BNR.

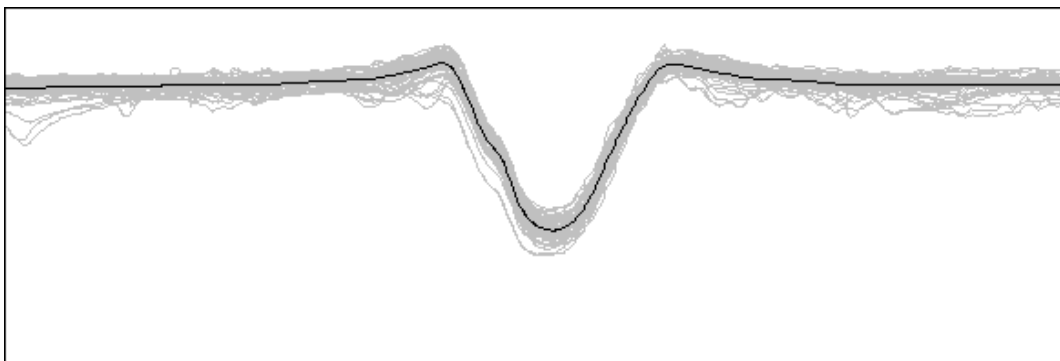


Figura 15 - Sobreposição de perfis e perfil médio para uma amostra BN riscada sob carga de 19N.

A partir da seção transversal média é possível determinar a largura do risco (medida de pico a pico), como mostra a figura 16, e também as áreas necessárias no cálculo do fator f_{ab} , como mostra a figuras 17.

A dureza ao risco e o coeficiente f_{ab} foram calculados para cada uma das 4 medidas realizadas. Dos resultados é tirada uma média e calculado o desvio padrão dessas medidas.

Durante os ensaios de esclerometria linear, a aquisição de dados do equipamento gerou um arquivo de texto onde foram recordados os valores do coeficiente de arrasto do identador para cada instante de tempo. Desses valores foi retirada uma média e também o desvio padrão.

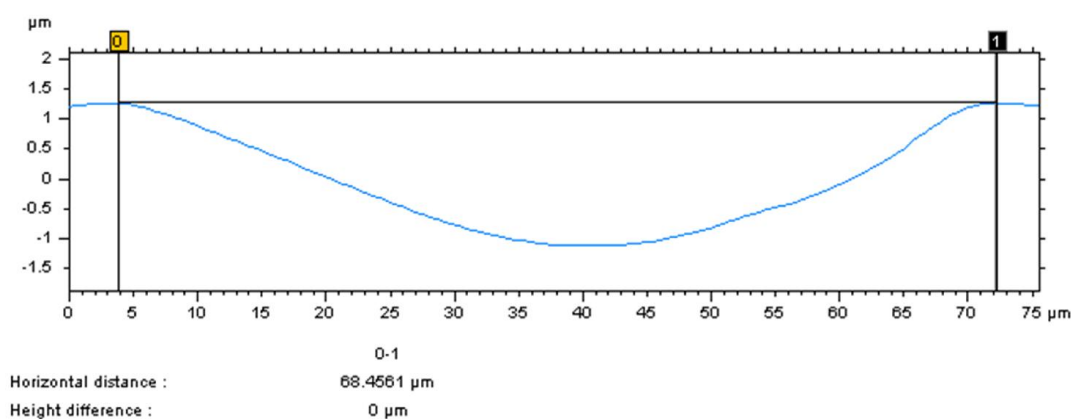


Figura 16 - Medida da largura de um risco em amostra BNR sob carga de 19 N.

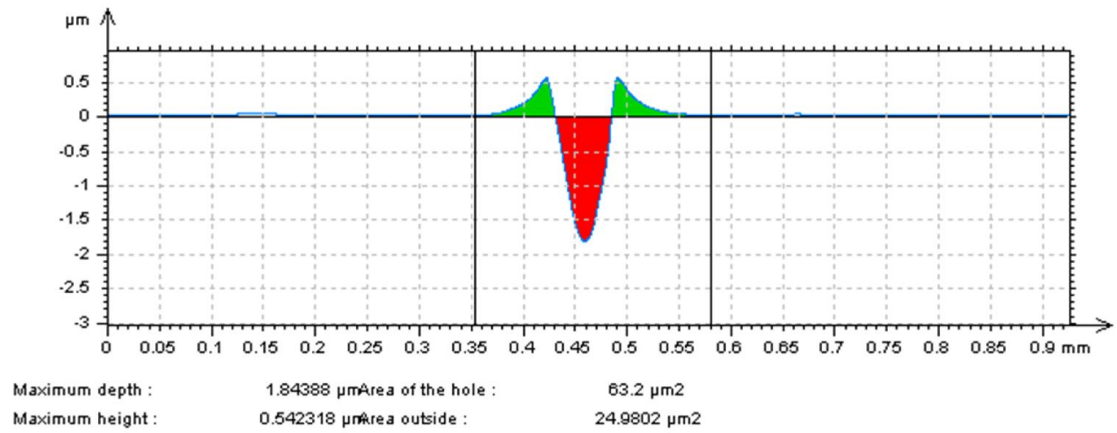


Figura 17 - Determinação das áreas A_v , A_1 e A_2 de um risco em amostra BNR sob carga de 19 N.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Dureza ao Risco

Utilizando a metodologia já apresentada, iniciou-se a análise da dureza ao risco. A tabela 4 mostra o número de dureza ao risco para cada amostra e cada carga normal utilizada calculados através da equação 5.

Tabela 4 - Resultados de dureza ao risco.

Amostra	DUREZA AO RISCO (GPa)		
	5 N	12 N	19 N
R	$2,52 \pm 0,57$	$2,52 \pm 0,03$	$2,60 \pm 0,04$
B	$4,00 \pm 0,57$	$3,76 \pm 0,05$	$3,80 \pm 0,04$
RN	$14,76 \pm 1,24$	$12,33 \pm 0,73$	$12,06 \pm 0,16$
BN	$14,27 \pm 1,23$	$14,61 \pm 0,53$	$14,59 \pm 0,37$
RNR	$9,47 \pm 0,20$	$8,18 \pm 0,17$	$8,93 \pm 0,19$
BNR	$10,53 \pm 0,43$	$10,40 \pm 0,16$	$10,49 \pm 0,10$
R(CrN)	$7,81 \pm 0,47$	$8,22 \pm 0,29$	$8,30 \pm 0,15$
B(CrN)	$7,43 \pm 0,49$	$8,18 \pm 0,17$	$8,93 \pm 0,19$
R(AlCrN)	$9,18 \pm 0,29$	$9,47 \pm 0,13$	$9,75 \pm 0,22$
B(AlCrN)	$9,32 \pm 0,40$	$9,54 \pm 0,31$	$9,87 \pm 0,15$

A figura 18 mostra um gráfico dos valores de dureza ao risco e os respectivos desvios padrões associados.

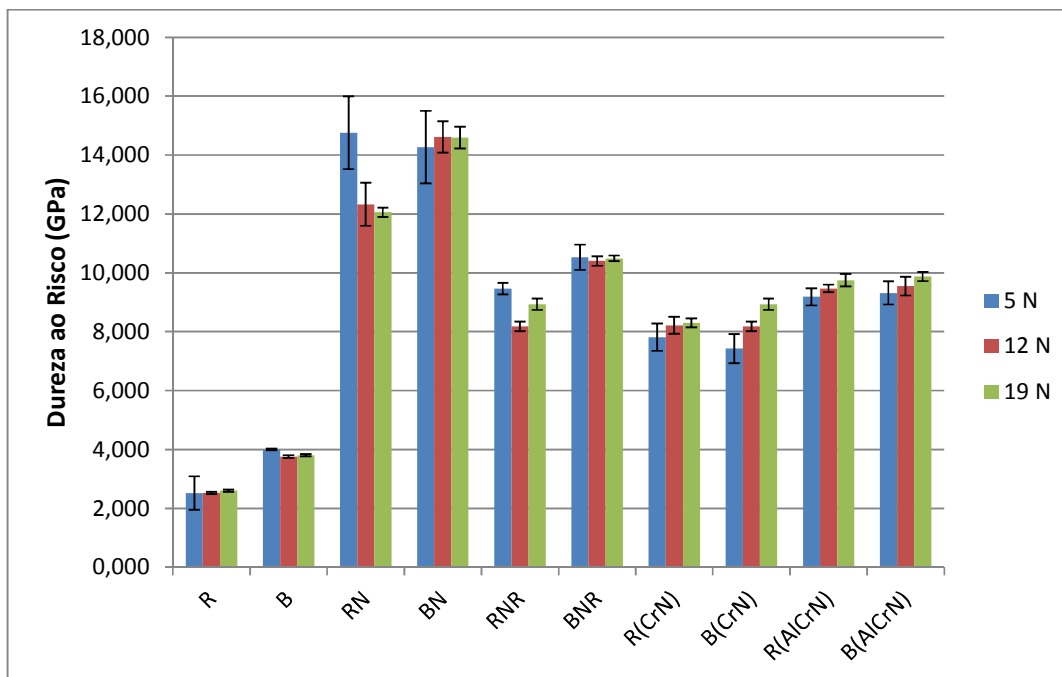


Figura 18 - Gráfico de dureza ao risco para as diferentes amostras e cargas de ensaio.

É possível observar certa independência desses valores em função da carga aplicada durante o ensaio para a maioria das amostras.

Os maiores desvios padrões foram observados nas amostras nitretadas não retificadas (RN e BN) devido à grande quantidade de defeitos superficiais inerentes à formação da camada de compostos, defeitos estes que são, muitas vezes, maiores que o próprio risco numa seção transversal. Esse desvio padrão tende a ser maior para as cargas mais baixas, devido à alta dureza de algumas amostras, o sulco formado chega a se confundir com a rugosidade do material, dificultando a determinação da largura. Com o aumento da carga de ensaio, o sulco torna-se maior e mais visível. As amostras não nitretadas (B e R), por sua vez, apresentaram o menor desvio padrão devido a sua grande capacidade de deformação, gerando um risco mais uniforme.

É possível observar ainda, que a dureza ao risco é maior nas amostras beneficiadas (B, BN e BNR) se comparadas às amostras recozidas (R, RN e RNR). As amostras revestidas [R(CrN), B(CrN), R(AlCrN) e B(AlCrN)] apresentaram uma dureza ao risco semelhante independentemente do tratamento térmico ao qual a amostra foi submetida.

As amostras não nitretadas (R e B) apresentaram menor dureza ao risco dentre os materiais analisados. Com a nitretação (RN e BN) um grande acréscimo no valor de dureza ao risco foi obtido, sendo as amostras com camada de compostos aquelas que apresentaram a maior dureza ao risco. A retirada da camada de compostos (RNR e BNR) resultou num decréscimo da dureza ao risco. As amostras beneficiadas, retificadas e revestidas com filmes de CrN [B(CrN)] apresentaram uma tendência de decréscimo da dureza ao risco quando comparadas às amostras não revestidas (BNR). Para as amostras beneficiadas revestidas por filmes de AlCrN [B(AlCrN)], esse decréscimo pode ser observado, apesar de menos evidente. É possível observar ainda que a dureza ao risco das amostras revestidas por AlCrN tende a ser maior se comparadas às amostras revestidas por CrN.

5.2 Coeficiente f_{ab}

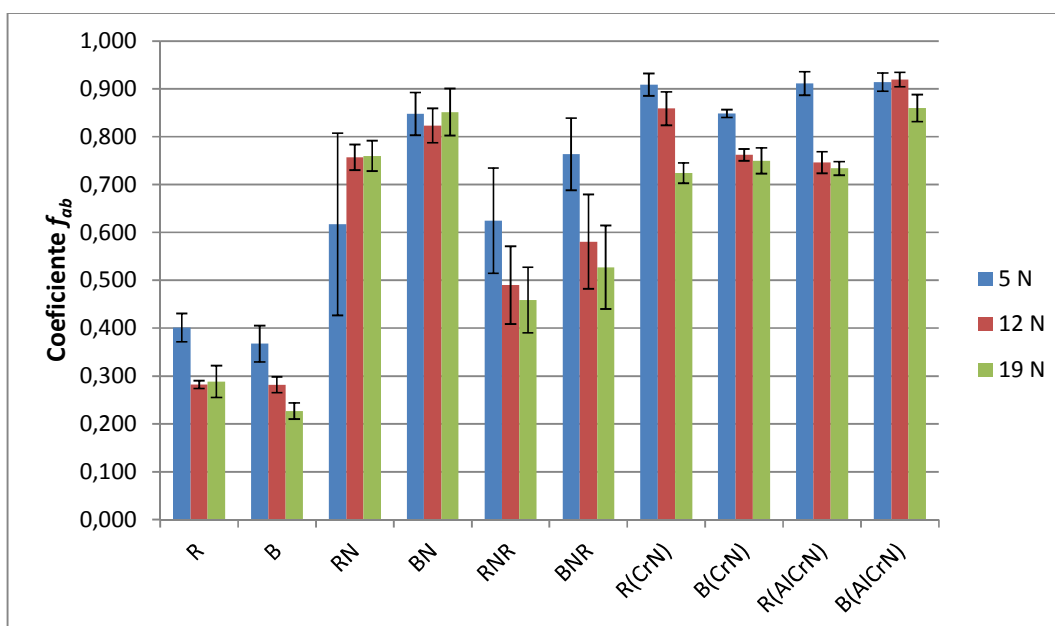
Através da metodologia apresentada foram calculados os valores de f_{ab} através da equação 2 e desvio padrão para cada amostra e cada carga. Esses resultados estão mostrados na tabela 5.

A figura 19 mostra o gráfico com todos os valores de f_{ab} e desvios padrões para cada amostra e cada carga.

Na análise desse coeficiente para os riscos de 5 N foram encontradas algumas dificuldades. Devido à pequena deformação das amostras nitretadas, muitas vezes o perfil de um risco mostra-se muito próximo à rugosidade da amostra, tornando difícil a definição das áreas A_v , A_1 e A_2 . Os maiores desvios padrões podem ser observados para os riscos executados sob essa carga.

Tabela 5 - Resultados do coeficiente f_{ab} .

Amostra	Coeficiente f_{ab}		
	5 N	12 N	19 N
R	$0,40 \pm 0,03$	$0,28 \pm 0,03$	$0,29 \pm 0,03$
B	$0,37 \pm 0,04$	$0,28 \pm 0,02$	$0,23 \pm 0,02$
RN	$0,62 \pm 0,19$	$0,76 \pm 0,03$	$0,76 \pm 0,03$
BN	$0,85 \pm 0,04$	$0,82 \pm 0,04$	$0,85 \pm 0,05$
RNR	$0,62 \pm 0,11$	$0,49 \pm 0,08$	$0,46 \pm 0,07$
BNR	$0,76 \pm 0,08$	$0,58 \pm 0,10$	$0,53 \pm 0,09$
R(CrN)	$0,91 \pm 0,02$	$0,86 \pm 0,04$	$0,72 \pm 0,02$
B(CrN)	$0,85 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,01$	$0,75 \pm 0,03$
R(AlCrN)	$0,91 \pm 0,02$	$0,75 \pm 0,02$	$0,73 \pm 0,03$
B(AlCrN)	$0,91 \pm 0,02$	$0,92 \pm 0,02$	$0,86 \pm 0,03$

Figura 19 - Gráfico do coeficiente f_{ab} para as diferentes amostras e cargas de ensaio.

Devido à maior ductilidade das amostras não nitretadas (R e B), estas apresentam o menor valor de f_{ab} , indicando ainda uma maior presença do mecanismo de microsulcamento. A nitretação das amostras (RN e BN) resultou num aumento do valor de f_{ab} , indicando uma presença mais evidente

do mecanismo de microcorte. A retirada da camada de compostos (RNR e BNR) proporcionou ao material uma maior ductilidade, e um consequente decréscimo do valor de f_{ab} . O revestimento das amostras com filmes PVD [R(CrN), B(CrN), R(AlCrN) e B(AlCrN)] provocou um aumento do valor de f_{ab} até valores próximos àqueles observados nas amostras não retificadas.

5.3 Coeficiente De Arrasto Do Identador (C_a)

Os resultados do coeficiente de arrasto do identador calculados através da equação 3 para as diferentes amostras e cargas são mostrados na tabela 6.

Tabela 6 - Resultados do coeficiente de arrasto do identador (C_a).

Amostra	Coeficiente de Arrasto		
	5 N	12 N	19 N
R	0,186 ± 0,010	0,227 ± 0,012	0,262 ± 0,014
B	0,109 ± 0,003	0,146 ± 0,003	0,270 ± 0,013
RN	0,042 ± 0,004	0,059 ± 0,004	0,075 ± 0,003
BN	0,043 ± 0,006	0,058 ± 0,003	0,071 ± 0,002
RNR	0,095 ± 0,005	0,122 ± 0,008	0,140 ± 0,004
BNR	0,074 ± 0,003	0,079 ± 0,002	0,097 ± 0,002
R(CrN)	0,071 ± 0,003	0,090 ± 0,002	0,108 ± 0,002
B(CrN)	0,071 ± 0,003	0,075 ± 0,001	0,089 ± 0,001
R(AlCrN)	0,074 ± 0,003	0,089 ± 0,003	0,106 ± 0,003
B(AlCrN)	0,069 ± 0,004	0,091 ± 0,002	0,106 ± 0,001

A figura 20 mostra os valores do coeficiente de arrasto plotados em um gráfico.

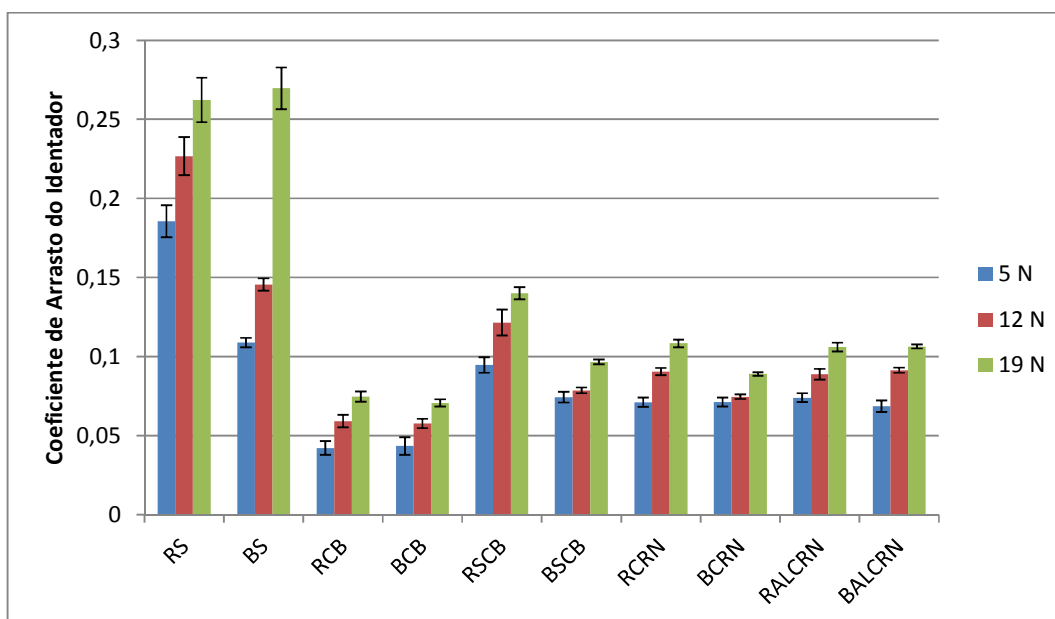


Figura 20 - Gráfico do coeficiente de arrasto do identador para as diferentes amostras e cargas de ensaio.

É possível observar que o aumento da carga resulta num aumento do C_a . As amostras não nitretadas (R e B) apresentam o maior coeficiente de arrasto, sendo este maior para a amostra recozida se comparada com a beneficiada sob as cargas de 5 e 12 N. Para a carga de 19N, o C_a das amostras não nitretadas é estatisticamente igual. Para as amostras nitretadas com camada de compostos (RN e BN) o coeficiente de arrasto mostrou-se o menor entre as análises, não havendo diferença evidente de C_a entre amostras recozidas e beneficiadas. A retirada da camada de compostos (RNR e BNR) provocou um aumento do C_a , sendo este maior para as amostras recozidas se comparadas às beneficiadas. As amostras beneficiadas revestidas tanto com AlCrN quanto com CrN [B(CrN) e B(AlCrN)] não apresentaram grandes variações do C_a quando comparadas às amostras sem camada de compostos, já as amostras recozidas [R(CrN) e R(AlCrN)] apresentaram uma diminuição do C_a após a aplicação dos revestimentos. O valor do coeficiente de arrasto para as amostras revestidas foi semelhante, não apresentando variações substanciais entre as amostras recozidas e beneficiadas e se mostrou maior que aquele para as amostras não retificadas.

5.4 Discussões

Uma vez que a dureza ao risco (H_s) é um parâmetro relacionado com o comportamento plástico de um material, é natural imaginar que exista uma relação direta entre dureza ao risco e dureza indentada (H_I), ou mesmo que estas sejam iguais. Na prática, esses dois parâmetros são raramente iguais e a razão H_s/H_I apresenta uma grande diversidade de valores para diferentes materiais. A tabela 7 apresenta alguns valores da razão H_s/H_I retirados da literatura (WILLIAMS, 1996) para alguns materiais.

Tabela 7 - Razões H_s/H_I de metais. Fonte: (WILLIAMS, 1996).

Material		H_I (MPa)	H_s (MPa)	H_s/H_I
Aço 1090		2800	3300	1,18
		3340	4200	1,26
		4330	5650	1,30
		7530	8800	1,17
		9420	10700	1,14
Alumínio	Recozido	216	196	0,91
Alumínio	Trabalhado a Frio	422	245	0,58
Cobre	Recozido	530	903	1,70
Cobre	Trabalhado a Frio	1079	853	0,79
Aço 1020	Recozido	1265	1295	1,02
Aço 1020	Trabalhado a Frio	2354	2247	0,95

No presente trabalho foi possível observar a grande variedade dessa razão para as diferentes amostras estudadas. Numa análise da dureza indentada de cada tipo de amostra, era natural esperar que os maiores resultados de dureza ao risco pertencessem às amostras de maior dureza, sendo estas as amostras revestidas por CrN e AlCrN. Os resultados aqui apresentados indicam uma situação muito diferente, as amostras de maior dureza indentada apresentaram

valores de dureza ao risco baixos, em alguns casos as amostras nitretadas e retificadas não revestidas apresentaram dureza ao risco maior que as revestidas. Esse quadro reafirma a grande complexidade dos mecanismos de deformação plástica atuantes durante o ensaio de esclerometria linear e como as características mecânicas, microestruturais e superficiais influenciam nos resultados de tal ensaio.

A dureza identada é um parâmetro de grande importância no que se refere à resistência de determinado material à abrasão. Esse parâmetro não é, porém, determinante. Materiais trabalhados a frio, por exemplo, não apresentam aumento significativo da resistência à abrasão, apesar de sua dureza aumentar consideravelmente em relação ao material não trabalhado (HUTCHINGS, 1992). Dessa maneira, a comparação de diferentes tipos de amostra quanto ao desgaste abrasivo não deve ser baseada apenas em seus valores de dureza *quasi* estática.

De maneira análoga, a dureza ao risco também não é um parâmetro determinante da resistência à abrasão de um material. Apesar de a esclerometria linear ser a simulação de um monoevento abrasivo, o desgaste abrasivo em si envolve mecanismos muito mais complexos. Em trabalho anterior, Vieira (2014) realiza ensaios de microabrasão em amostras do aço ABNT 8550 com as mesmas características das amostras deste trabalho. Avaliou-se o comportamento quanto à microabrasão de amostras beneficiadas e recozidas (RE e BE), nitretadas com (RCCB e BCCB) e sem (RSCB e BSCB) a camada de compostos. A figura 21 apresenta os resultados do coeficiente de desgaste médio para as diferentes amostras estudadas por Vieira.

No presente trabalho, as amostras nitretadas com camada de compostos apresentaram a maior dureza ao risco dentre os materiais analisados. As análises de Vieira revelam que esse material apresentou o maior coeficiente de desgaste, reafirmando que a dureza ao risco sozinha não é uma propriedade determinante da resistência à abrasão.

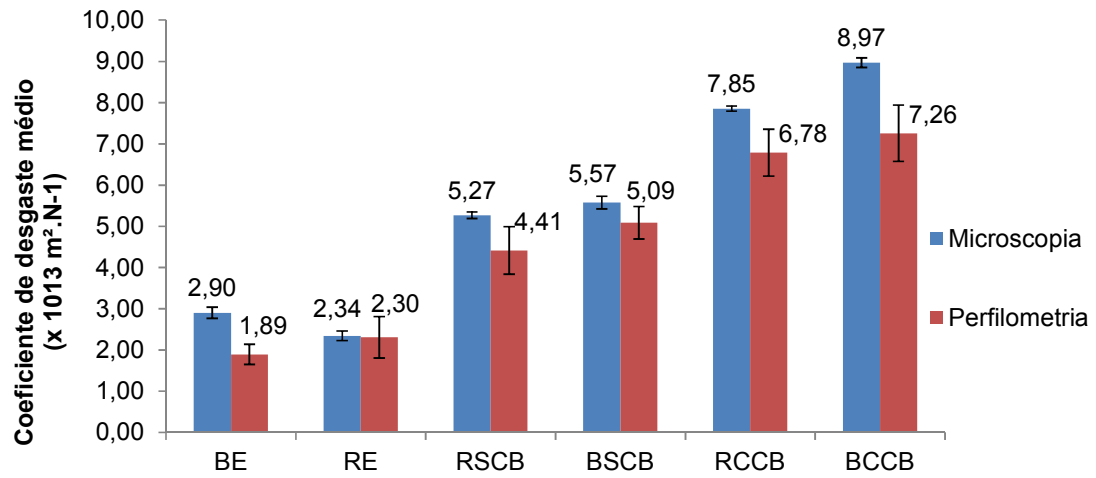


Figura 21 - Coeficiente de desgaste médio em ensaios de microabrasão do aço ABNT 8550. Fonte: (VIEIRA, 2014).

6 CONCLUSÕES

Por fim, algumas conclusões podem ser tiradas após as análises dos resultados obtidos:

- A martensita revenida (B) apresenta maiores valores de dureza ao risco se comparada à estrutura ferrítica-perlítica (R). Esse comportamento pode ser observado para as amostras nitretadas, apesar de menos evidente. A microestrutura das amostras revestida apresenta pouca influência em seus valores de dureza ao risco.
- A característica microestrutural das amostras ensaiadas apresenta pouca influência nos valores do coeficiente f_{ab} .
- A martensita revenida apresenta menores valores do coeficiente C_a se comparada à estrutura ferrítica-perlítica (exceto sob carga de ensaio de 19 N). Nas amostras nitretadas e retificadas esse comportamento também é observado. Para as amostras com camada branca e revestidas pouca influência pôde ser observada.
- A nitretação das amostras proporcionou um grande aumento da dureza ao risco e do coeficiente f_{ab} , associados a uma diminuição do coeficiente C_a , a aplicação de revestimentos PVD ao aço ABNT 8550 nitretado não apresentou melhoras significativas nesses parâmetros, apresentando, em alguns casos, propriedades inferiores às amostras nitretadas com e sem camada branca.
- As amostras revestidas com AlCrN apresentam dureza ao risco ligeiramente superior àquelas revestidas com CrN.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios de esclerometria linear com cargas maiores para uma melhor avaliação das transições dos mecanismos de desgaste;
- Utilizar o ensaio de esclerometria linear com a aplicação de carga linearmente crescente para avaliar a adesão dos revestimentos PVD;
- Avaliar diferentes condições de nitretação a plasma através dos ensaios de esclerometria linear;
- Avaliar uma maior gama de revestimentos viáveis na fabricação dos rotores de bombas multifásicas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM **G171: Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus**. 3 ed. West Conshohocken: Astm International, 2009.
- BULSARA, V. H. *et al.*: **ASM Handbook; Mechanical Testing and Evaluation: Scratch Testing**. 2. ed. Ohio: ASM International, 2000. 2235 p. (Vol.8), pp. 676-694.
- FERREIRA, F. M.: **Avaliação Tribomecânica via Esclerometria Retilínea e Identação Instrumentada do Aço ABNT 8550**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. London: Edward Arnold, 1992.
- JACOBSSON, S. *et al.*: **ASM Handbook; Friction, Lubrication and Wear Technology: Scratch Testing**. 2. ed. Ohio: ASM International, 2000. 2235 p. (Vol.18), pp. 820-837.
- MARTINS M. A.; **Esclerometria Linear do Aço ABNT 8550**. Congresso brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Aracajú, 2013.
- MORAIS, J. M.: **Petróleo em Águas Profundas: Uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore**. Brasília: Ipea : Petrobrás, 2013. 424 p.
- OLIVEIRA, M. F. **Análise da Aplicação de um Sistema de Bombeamento Multifásico Submarino na Produção de Petróleo**. 2003. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SILVA, F. J.: **Erosão, Corrosão, Erosão-Corrosão e Cavitação do Aço ABNT 8550 Nitretado a Plasma**. 2008. 252 f. Tese (Doutorado) - Curso

de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SINATORA, A.: **Tribologia: Um resgate histórico e o estado da arte.** Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005. 33 p.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W.: **Engeneering Tribology.** 2. ed.: Butterworth-Heinemann, 2001. 744 p.

STROUD, M. F.; WILMAN, H.. The proportion of the groove volume removed as wear in abrasion of metals. **Brit. J. Appl. Phys.**, London, v. 13, p.173-178. 1962.

TABOR, D.: **The physical meaning of indentation and scratch hardness.** Research Laboratory on the Physics and Chemistry of Surfaces, Department of Physical Chemistry. Cambridge, 1956.

VIEIRA, B. N.. **Resistência à microabrasão de camadas nitretadas do aço abnt 8550.** 2014. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

WILLIAMS, J. A.: Analytical Modes of Scratch Hardness. **Tribology International**, v. 29, n. 8, p.675-694, 1996.

WREDENBERG, F.; LARSSON, P.: Scratch testing of metals and polymers: Experiments and numerics. **Wear**, n. 266, p.76-83, 2009.

ZUM GAHR, K.: **Microstructure and Wear of Materials.** Amsterdam: Elsevier, 1987. 560 p.