

RODRIGO JOSÉ BRASIL WANDA BRU

AVALIAÇÃO MECÂNICA DE SUPERFÍCIES DO AÇO SAE 4144

**CURITIBA
2006**

RODRIGO JOSÉ BRASIL WANDA BRU

AVALIAÇÃO MECÂNICA DE SUPERFÍCIES DO AÇO SAE 4144

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Sofia Clímaco Monteiro D'Oliveira

**CURITIBA
2006**

FICHA CATALOGRÁFICA

Bru, Rodrigo José Brasil Wanda

Avaliação mecânica de superfícies do Aço SAE 4144 /

Rodrigo José

Brasil Wanda Bru - Curitiba, 2006.

ix, 64 f.: il., tab., graf.

Orientadora: Ana Sofia Clímaco Monteiro D'Oliveira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do
Paraná, Setor

de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Inclui Bibliografia.

1. xxxxxxxx
 2. XXXXXXXX.
 3. XXXXXXXXXX.
- I. D'Oliveira, Ana Sofia Clímaco Monteiro. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD

XXX.XX

TERMO DE APROVAÇÃO

RODRIGO JOSÉ BRASIL WANDA BRU

AVALIAÇÃO MECÂNICA DE SUPERFÍCIES DO AÇO SAE4144

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica, área Manufatura, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Karin Soldatelli Borsato
PUC-PR

Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes
UFPR/PG-Mec

Prof^a. Dr^a. Ana Sofia Clímaco Monteiro D'Oliveira
UFPR/PG-Mec
Presidente

Curitiba, 21 de agosto de 2006

Dedico esta dissertação à minha
esposa, Christiane.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Paraná, instituição pública gratuita e de qualidade, por viabilizar o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, por disponibilizar a estrutura de laboratórios e profissionais necessários.

A minha orientadora Professora Dra. Ana Sofia Clímaco Monteiro D'Oliveira, pela paciência, apoio e trabalho em meu benefício sem o qual este trabalho não seria viável.

À empresa Robert Bosch LTDA pelos recursos fornecidos.

A minha família, pelo amparo nas horas mais difíceis desta caminhada.

Agradeço a Deus, minha fonte de força e inspiração.

RESUMO

A degradação de componentes mecânicos em consequência das condições de serviço na maioria dos casos se concentra ou inicia na sua superfície, devido, por exemplo, a fenômenos de desgaste. O estudo dos mecanismos de diferentes fenômenos de degradação mecânica de duas superfícies é feito pela Tribologia. No entanto por esta degradação depender do sistema tribológico existem dificuldades na qualificação de componentes. No sentido de qualificar componentes em relação à possibilidade de apresentarem maior ou menor resistência a esta degradação faz-se necessário a compreensão de diferentes técnicas de caracterização de superfícies que possam cobrir um amplo espectro de solicitações. Neste trabalho propõe-se avaliar as características mecânicas de superfícies, através de medidas de dureza, risco, desgaste por deslizamento abrasivo e adesivo com o intuito de encontrar relações/tendências de comportamento entre estas diferentes técnicas de caracterização. A metodologia empregada selecionou um aço em diferentes condições superficiais, assim foram avaliadas as condições de aço SAE 4144 normalizado, SAE 4144 temperado e revenido e aço SAE 4144 temperado, revenido e nitretado. Depois de preparadas, as superfícies foram retificadas, antes de ser medida a sua dureza (microdureza Vickers e dureza Rockwell), resistência ao risco, desgaste por deslizamento abrasivo e adesivo (ensaio tipo pino sobre disco abrasivo e disco metálico). Os resultados mostraram que o aumento da dureza resulta em maior resistência ao desgaste por deslizamento abrasivo e adesivo. Já a correlação dos resultados do ensaio de risco com as características da superfície depende do tipo de teste realizado e da presença ou não de gradiente de dureza na superfície.

Palavras-chave: tribologia, ensaio de dureza, ensaio de risco, desgaste abrasivo, desgaste por deslizamento.

ABSTRACT

Failure of mechanical components in most cases is concentrated or starts at their surface, as in wear. Tribology studies the different wear mechanisms and states that the tribological systems determine the degradation of the component. Therefore qualifying surfaces becomes a non-universal procedure, as it depends on the tribological features. Nevertheless it is required to understand different testing procedures and their results, to evaluate a surface regarding their mechanical behavior. Through this work, three different surfaces of an SAE 4144 steel (normalized; quench and temper; quench, temper and plasma nitrided) were evaluated using hardness tests (Rockwell and HV1), scratch tests under constant and increasing load, sliding and abrasive wear tests.

Results showed that an increasing on surface hardness is followed by an increase or wear resistant, measured by wear loss. Scratch tests results are dependable on the testing procedures, and on surface features such as the presence of a hardness gradient, requiring therefore a more qualified operator.

Keywords. *tribology, hardness test, scratch test, abrasive wear, sliding wear.*

SUMÁRIO

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
SUMÁRIO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABELAS.....	vii
CAPÍTULO 1	9
INTRODUÇÃO.....	9
CAPÍTULO 2	10
REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1. AÇO SAE	10
2.2. TÊMPERA E REVENIDO.....	10
2.3. NITRETAÇÃO	11
2.4. DUREZA	18
2.5. ENSAIO DE RISCO	21
2.6. DESGASTE POR DESLIZAMENTO.....	27
2.7. DESGASTE ABRASIVO	29
2.8. OUTROS TRABALHOS RELACIONADOS	32
CAPÍTULO 3	35
MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1. METODOLOGIA	35
3.2. IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS	36
3.3. MICROESTRUTURA	36
3.3.1. Preparação da Superfície	36
3.3.2. Ataque Químico	37
3.3.3. Microscopia Ótica	38
3.4. DUREZA	38
3.5. ENSAIO DE RISCO	38
3.5.1. Preparação das Amostras.....	39
3.5.2. Riscos.....	39
3.6. ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO ADESIVO E ABRASIVO.....	41
3.6.1. Preparação da amostra	41

3.6.2.	Desgaste por deslizamento adesivo	42
3.6.3.	Desgaste por deslizamento abrasivo.....	42
CAPÍTULO 4		43
APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....		43
4.1.	MICROESTRUTURAS	43
4.2.	DUREZA	45
4.2.1.	Macro dureza.....	45
4.2.2.	Micro dureza	45
4.3.	ENSAIO DE RISCO	46
4.3.1.	Ensaio com Aumento Progressivo da Carga.....	46
4.3.2.	Ensaio com Carga Constante	51
4.3.	ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO ADESIVO	54
4.4.	ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO	56
4.5.	AVALIAÇÃO MECÂNICA DE SUPERFÍCIES.....	58
CAPÍTULO 5		60
CONCLUSÕES		60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Esquema básico de um equipamento para nitretação iônica (Alves, 2001).	14
Figura 2-2. Camada nitretada no aço carbono (Liliental, 1999).	16
Figura 2-3. Camada nitretada no aço ligado (Liliental, 1999).	16
Figura 2-4. Equivalência entre escalas de dureza (ASM, 2000).	19
Figura 2-5. Resistência ao desgaste abrasivo de diferentes materiais (Rabinowicz, 1965)	21
Figura 2-6 Esquema de funcionamento do ensaio de risco (Mezlini, 2004).	23
Figura 2-7 (a) Princípio de um ensaio de risco e (b) ciclo de deslizamento (Mezlini, 2004)	24
Figura 2-8. Modos de deformação (a) micro sulcamento, (b) micro corte, (c) micro lascamento (Aguila, 2005).	24
Figura 2-9. Secção transversal de um risco e definição do valor de f_{ab} (Rabinowicz, 1965)	26
Figura 2-10 Correlação entre f_{ab} e dureza (Rabinowicz, 1965)	26
Figura 2-11 Razão da dureza por f_{ab} em relação à resistência ao desgaste abrasivo (Rabinowicz, 1965)	27
Figura 2-12 Esquema do funcionamento de um ensaio do tipo pino sobre disco (Tekeli, 2006)	29
Figura 2-13. Fatores do sistema tribológico que influenciam no desgaste abrasivo. (Rabinowicz, 1965).	30
Figura 2-14 Relação entre dureza e resistência ao desgaste abrasivo para aços martensíticos e austeníticos (Rabinowicz, 1965)	32
Figura 3-1. Representação esquemática da macrografia da amostra	35
Figura 3-2. Amostra Metalográfica.	37
Figura 3-3. CSM Scratch Tester.	39
Figura 3-4. Equipamento de risco do Laboratório de Engenharia de Superfícies - UFPR	40
Figura 3-5. Equipamento de desgaste do tipo pino sobre disco desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia de Superfícies da UFPR.	41
Figura 4-1. Microestruturas da seção transversal das superfícies em avaliação	44
Figura 4-2. Macro dureza HRC	45
Figura 4-3. Perfil de dureza das amostras	46
Figura 4-4. Microscopia do risco para diferentes superfícies	47
Figura 4-5. Exemplo de resultado obtido pelo ensaio de risco	48
Figura 4-6. Largura do risco por carga aplicada.	50
Figura 4-7. Correlação entre microdureza e largura do risco – 2N	50
Figura 4-8. Correlação entre dureza e profundidade do risco – 150N	51
Figura 4-9. Perfil transversal do risco – 60N	52
Figura 4-10 Correlação entre largura do risco e dureza superficial.	53
Figura 4-11 Correlação entre a profundidade do risco e a dureza	54
Figura 4-12. Perda de massa por distância percorrida para a carga de 10N	54
Figura 4-13. Correlação entre desgaste, dureza, largura e profundidade do risco	56
Figura 4-14. Perda de massa por distância percorrida para a carga de 10 N	57
Figura 4-15. Correlação entre desgaste, dureza, profundidade e largura do risco	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1. Escala de Mohs (ASM, 2000)	22
Tabela 3-1. Composição química do aço SAE 4144	35
Tabela 3-2. Parâmetros do processo	36
Tabela 3-3. Parâmetros do ensaio de risco com aumento progressivo de carga	39
Tabela 3-4. Parâmetros do Ensaio com Carga Constante	40
Tabela 4-1. Largura dos riscos e profundidade de penetração	49
Tabela 4-2. Principais tendências observadas	58

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O atual desenvolvimento industrial confirma a importância da utilização de processos termoquímicos ou revestimentos superficiais para obtenção de características mecânicas importantes sem elevar o preço dos produtos. Após a proteção do componente é determinante disponibilizar-se procedimentos para qualificação/caracterização da superfície em função de solicitações a que esta estará exposta. A degradação de componentes mecânicos em consequência das condições de serviço na maioria dos casos concentra-se ou inicia na superfície em razão, por exemplo, do desgaste. Para prever/estimar esta degradação é necessário o desenvolvimento de técnicas de caracterização de superfícies que possam abranger o maior número possível de solicitações.

Propõe-se neste trabalho avaliar as características mecânicas de superfícies, através de medidas de dureza, risco, desgaste por deslizamento adesivo e abrasivo com o intuito de estabelecer relações/tendências entre estas técnicas de qualificação de superfícies. A metodologia prevê a coleta de três tipos diferentes de superfícies (aço SAE 4144 sem tratamento, aço SAE 4144 temperado e revenido, aço SAE 4144 temperado, revenido e nitretado). Para caracterizar as amostras serão coletados dados de dureza utilizando-se os métodos tradicionais de identificação além de dados obtidos através do ensaio de risco (*scratch test*) e ensaios de desgaste por deslizamento adesivo e abrasivo.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura, contendo assuntos relacionados ao que se pretende desenvolver no presente trabalho. O Capítulo 3 explica com detalhes os materiais e métodos utilizados no processo de pesquisa. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e sua discussão. Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Para o desenvolvimento desta proposta de trabalho, é necessário um conhecimento aprofundado sobre as técnicas empregadas para avaliação das superfícies bem como das características do material utilizado. Este capítulo apresenta o embasamento teórico e os trabalhos mais atuais encontrados na literatura sobre a avaliação mecânica de superfícies.

2.1. AÇO SAE

Existem várias entidades que estabelecem normas para codificação de aços de acordo com o teor de carbono e dos elementos de liga, como por exemplo, a SAE (*Society of Automotive Engineers*). Os dois últimos algarismos indicam o teor de carbono em porcentagem. Como exemplo pode-se citar um aço SAE 1020 com 0,20 % de carbono (ASM, 2000).

2.2. TÊMPERA E REVENIDO

O tratamento térmico de têmpera nos aços tem como objetivo uma microestrutura martensítica que proporcione propriedades de dureza e resistência mecânica elevadas.

Metais a serem temperados são inicialmente aquecidos à temperatura de austenitização (Chiaverini, 2000). O aquecimento deve ser lento no início, a fim de não provocar distorções no metal. A manutenção da temperatura varia de acordo com a forma da peça, e o tempo nessa fase deve ser bem controlado. Em seguida, a peça é submetida a um resfriamento rápido. A microestrutura resultante é composta predominantemente de martensita, uma fase que apresenta elevada dureza.

Devido à elevada dureza, a presença de martensita torna os componentes frágeis e quebradiços, desta forma, em grande parte das aplicações, é necessário um tratamento posterior de revenimento.

Mesmo em se tratando de um processo aceito e utilizado pela comunidade industrial, características específicas dos componentes do material ainda motivam diversas pesquisas. Entre estas, é possível mencionar o trabalho recente de Gracioso et al. (2003) que estudou o efeito da temperatura de austenitização e da velocidade de resfriamento nas microestruturas e propriedades mecânicas do aço CA6NM como temperado, bem como o efeito do tratamento de revenido sobre a têmpera. Utilizou-se o mesmo material empregado na confecção de um rotor tipo Francis fabricado na Altona, buscando-se a simulação das condições mais críticas de têmpera que poderiam levar a degradação das propriedades mecânicas, principalmente da tenacidade. Verificou-se que, para o material em estudo, as propriedades eram determinadas pela temperatura de austenitização e que a velocidade de resfriamento apresentava um papel secundário no seu desenvolvimento.

Outro trabalho relevante foi o de Tekeli et al. (2006), onde se estudou o efeito da têmpera na resistência ao desgaste por deslizamento adesivo em aços com adição de grafite e níquel. Pode citar-se ainda Noordin (2006), onde se investigou o efeito da têmpera nos mecanismos de desgaste em aços ferramenta e aços ferramenta recobertos.

O processo de têmpera provoca tensões indesejadas nos materiais tratados. Para reverter esta situação, é utilizado o processo de revenimento, que consiste em um tratamento térmico de aquecimento abaixo da temperatura do eutetóide, seguido pelo resfriamento a uma taxa apropriada. Este processo é utilizado principalmente para eliminar as tensões internas em materiais metálicos (ASM, 2000). Geralmente, em aços carbono o revenimento produz uma microestrutura de martensita fina revenida.

No trabalho de Loganathan et al. (2006) o tratamento térmico de revenido foi utilizado para avaliar o efeito do tratamento no alumínio comercial puro. Já em Song et al. (2005) foram avaliadas as propriedades mecânicas de aços carbono-manganês após deformação a quente e revenimento. A transformação de fases e dureza em revestimentos ternários Ni-P-Al após revenimento foi estudada em Wu et al. (2006).

2.3. NITRETAÇÃO

Nitretação consiste em um processo termoquímico de enriquecimento da superfície do aço com nitrogênio, visando à formação de camada rica em nitretos, de natureza cerâmica, alta dureza (> 900HV), baixo coeficiente de atrito, e alta resistência a desgaste. Além disso,

por ser um tratamento conduzido a baixa temperatura em relação à temperatura utilizada na cementação, altera muito pouco as dimensões do material.

O processo conhecido como nitretação iônica ou nitretação a plasma foi patenteado em 1931 por J.J. Egan nos EUA e em 1932 por Berghaus na Alemanha, mas somente em 1960 teve início o seu uso comercial (Alves, 2001).

A nitretação a plasma é um processo utilizado para a melhoria de várias propriedades mecânicas de superfícies metálicas como, por exemplo, dureza, ductilidade, resistência ao desgaste e à corrosão, o que resulta em um aumento da vida útil das peças tratadas. A nitretação a plasma pode ser utilizada no tratamento de peças feitas a em aços liga e aços sintetizados. As aplicações industriais são várias, abrangendo o tratamento de ferramentas de corte, engrenagens, partes de válvulas, eixos-manivela, partes de bombas, mancais, partes de turbinas etc. As principais vantagens desta técnica contra o processo convencional de nitretação em banho de sal de amônia e gás são: aumento, no mínimo de duas vezes, da vida útil dos componentes tratados, não formação de rejeitos poluentes, economia de energia (energia elétrica é utilizada apenas para aquecer as peças e não as paredes como em um forno), tempo de processamento mais curto, sem acabamento adicional após nitretação (Ferreira, 2003). Isto, porque só o processo a plasma permite a formação de uma estrutura de camadas, onde as fases ϵ - $(\text{Fe}_3\text{N} - \text{Fe}_2\text{N})$ e γ - Fe_4N podem estar presentes nas proporções e na ordem pré-escolhidas. Além disto, as peças nitretadas podem ser seqüencialmente (no mesmo reator) recobertas com filmes cerâmicos de Al_2O_3 , TiC , TiN , dando origem a materiais compostos utilizados no recobrimento de ferramentas de corte de ultima geração. (Yuasa et al., 2003)

Embora o investimento inicial em equipamentos seja mais alto do que nos processos metalúrgicos convencionais para a nitretação, os custos de produção são menores devido à economia de tempo e energia. (Ferreira, 2003)

As vantagens da nitretação a plasma são (Alves, 2001):

- Baixa temperatura de tratamento, evitando distorções dimensionais que normalmente ocorrem em tratamentos a maiores temperaturas.
- Controle da camada nitretada através das variáveis do processo.
- Tempo de tratamento inferior, a taxa acelerada de nitretação pode ser atribuída à transferência mais efetiva de nitrogênio do plasma para a superfície do metal e à presença de outras espécies ativas no plasma.

- Uniformidade na espessura da camada, assim a espessura da camada é extremamente uniforme independente da distância entre eletrodos.
- Nitretação de partes da peça, áreas que não se pretende nitretar podem ser protegidas com materiais isolantes ou com materiais metálicos sem haver necessidades de grandes ajustes entre a peça e a máscara protetora.
- Possibilidade de desnitretação - através de um tratamento em plasma utilizando apenas hidrogênio como atmosfera em fluxo contínuo. Através da formação de amônia, o nitrogênio é retirado da peça e levado para fora do sistema.
- Mais economia, menor consumo de gás e de energia e, de um modo geral, a manutenção do equipamento de nitretação possui um custo inferior ao custo da nitretação convencional.

Por outro lado, as limitações deste método são (Alves, 2001):

- Efeito em cátodo oco, que se baseia no aumento da densidade do plasma em algumas regiões que possuem pequenos furos ou concavidades que leva a um aumento da concentração de elétrons secundários na região. Este efeito é quase sempre indesejável porque leva a um maior aquecimento nas partes da peça que possuam geometrias complexas.
- Efeito da razão A/V (área superficial/volume), pois um outro efeito igualmente indesejável na nitretação de peças é o superaquecimento em partes da peça que possuam uma maior relação A/V .
- Abertura de arcos catódicos, quando o arco é aberto, há uma queda de potencial e, como este novo potencial é normalmente inferior à tensão de ruptura do arco, o plasma se extinguirá. Por outro lado, se o equipamento for de alta potência, haverá uma fusão localizada, que poderá danificar as peças.
- Penetração do plasma em pequenos furos: para peças com pequenos furos, há um limite de diâmetro abaixo do qual o plasma não penetrará e a parte interna do furo não será nitretada. Esta limitação pode se transformar numa vantagem, caso não se pretenda nitretar o furo.

Os equipamentos utilizados como, por exemplo, bombas de vácuo e fonte de tensão/corrente têm uma vida útil longa e requerem pouca manutenção, o que também contribui bastante para a redução de custos. O processo permite alto grau de automação e

monitoração assegurando um elevado padrão de qualidade. Peças de pequeno porte podem ser tratadas em equipamentos comerciais convencionais para os processos termoquímicos a plasma. Entretanto, a tecnologia atual já permite que peças mais volumosas, como barras e tubos de grande metragem, possam ser processadas em equipamentos incorporados à linha de produção. (Ferreira, 2003)

Foi reconhecido que os processos termoquímicos a plasma reduzem significativamente os problemas ambientais quando comparados com os processos convencionais, gasosos e banhos de sal. Os principais benefícios ambientais são: não produção de resíduos tóxicos e fumaça, risco de explosão mínimo, poluição pouco significativa em termos de ruído e calor, redução no tempo de processamento, redução no consumo de energia e redução significativa no consumo de gases. (Ferreira et al., 2003)

Um equipamento típico de nitretação iônica está esquematizado na Figura 2-1. Ele é constituído basicamente de um sistema de vácuo, uma fonte de potência e um reator.

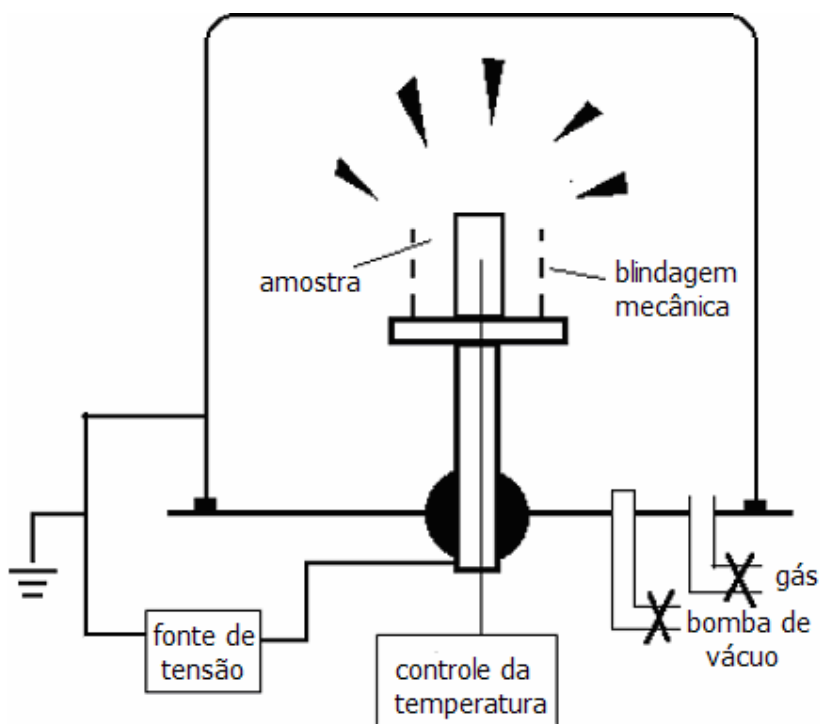


Figura 2-1. Esquema básico de um equipamento para nitretação iônica (Alves, 2001).

A camada nitretada é formada pela difusão de átomos de nitrogênio no aço. O nitrogênio atômico é obtido pela dissociação térmica de amônia na superfície do aço. Para baixas concentrações, forma-se solução sólida do substrato do material. Quando a

concentração excede o limite máximo de solubilidade do material nitretos são formados. No caso de aços não ligados, o primeiro nitreto que se forma é o γ' (Fe_4N). Elevada concentração de nitrogênio conduz à formação de nitreto ε (Fe_{2-x}N). Quando crescem os nitretos dispersos, uma camada superficial é eventualmente formada e conhecida como “camada de compostos”, ou “camada branca”. Para alguns aços ligados, a seqüência de formação das fases constituindo a camada branca pode ser diferente. O termo “branca” está relacionado com a resistência ao ataque do reagente químico “nital” (ácido nítrico diluído em álcool) utilizado para revelar a microestrutura da camada nitretada. (Ferreira, 2003)

A Figura 2-2 e a Figura 2-3 mostram as camadas nitretadas típicas para aço carbono e aço ligado. Verifica-se que existe diferença substancial entre as camadas nitretadas formadas para aços de diferentes composições e, com efeito, nas suas propriedades.

No caso de aço carbono, todas as propriedades estão concentradas na camada branca.

O nitrogênio da camada de difusão abaixo da camada branca se apresenta como agulhas de nitretos, mas o efeito disso na dureza é limitado.

A camada branca responde, principalmente, pela resistência ao desgaste, sendo normalmente de espessura maior nos aços ligados e contém alguma porosidade na zona superficial. Esta porosidade pode, atualmente, ser utilizada em aplicações onde resistência à corrosão é exigida.

Quando os aços contêm elementos formadores de nitretos como Cromo, Manganês, Titânio e Vanádio, a zona de difusão abaixo da camada branca fica endurecida, criando um “perfil de dureza”. A dureza na superfície é elevada e diminui à medida que se avança para o interior do material e ocorre um decréscimo da concentração de nitrogênio. Na maioria dos aços, quando a superfície é adequadamente atacada com um reagente químico, a camada de difusão é vista como uma zona escura. Nos aços ligados a camada branca é a superfície externa, embora não necessariamente, responsável pela resistência ao desgaste.

O incremento de dureza na camada de difusão oferece suporte para a camada branca. A camada de difusão é a transição entre a camada branca e o núcleo do material. Essa dureza, assim como a profundidade, tem um efeito significativo nas propriedades de fadiga. Resistência à fadiga depende significativamente da dureza do núcleo que é resultado do tratamento térmico precedente ao processo de nitretação. (Ferreira, 2003)

Outra importante função desta camada é a proteção contra corrosão.

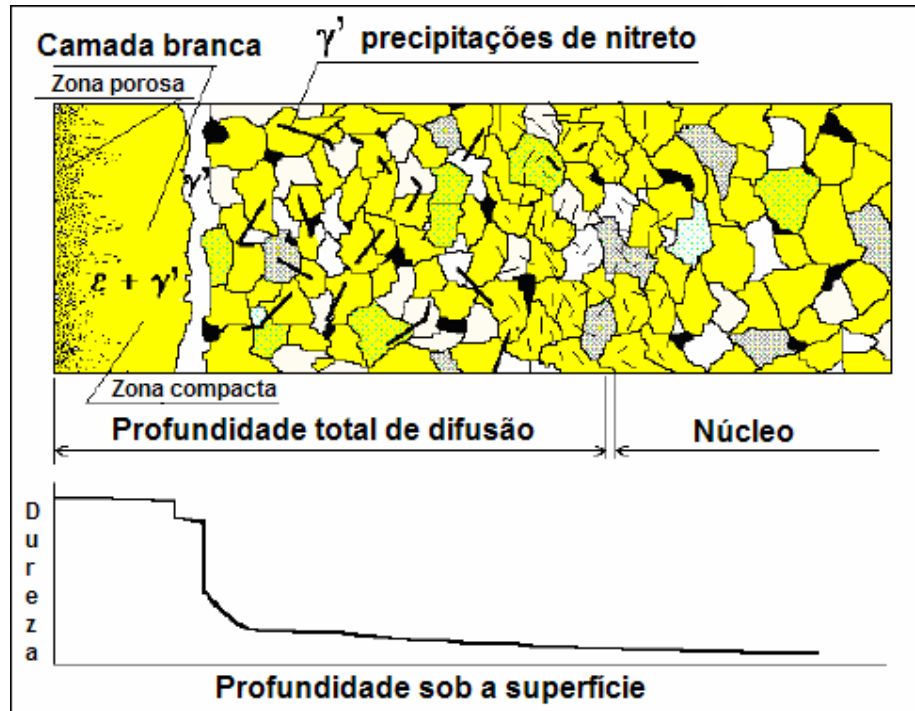


Figura 2-2. Camada nitretada no aço carbono (Liliental, 1999).

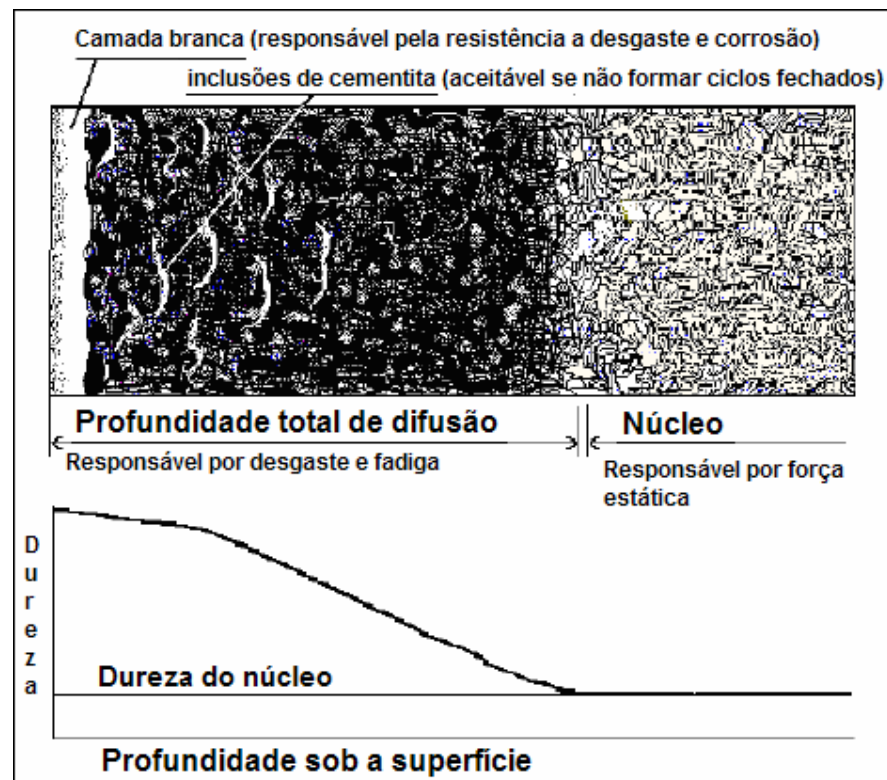


Figura 2-3. Camada nitretada no aço ligado (Liliental, 1999).

O estudo da nitretação busca a melhoria do desempenho mecânico de superfícies e tem sido utilizado para diversos materiais visando aplicações distintas. Em ligas não ferrosas, é possível mencionar os trabalhos recentes de Biel et al. (2005) e Kapczinski et al. (2003) que buscam correlacionar microestruturas e parâmetros de processos com o respectivo desempenho tribológico.

A aplicação sobre diferentes aços em Esfandiari et al. (2006), Rocha et al. (2001), Björk et al. (2001) e Mahboubi et al. (2005) buscando a verificação da resistência ao desgaste e/ou corrosão de diversos componentes mecânicos tem sido foco de pesquisadores. A comparação com outros processos de proteção de componente, como a galvanização mostrou uma melhora significativa na resistência à corrosão. (Ferreira, 2003)

A utilização de nitretação a plasma junto com outras técnicas de revestimento é apresentada como uma evolução na melhoria do desempenho ao desgaste (Podgornik, 2001a, Podgornik, 2001c) e à erosão por cavitação (Godoy et al., 2005).

Alterações no processo de nitretação a plasma e outros procedimentos de nitretação também são encontrados na literatura (Alves, 2001). Amostras de aço foram tratadas com a técnica de nitretação a plasma por tela ativa (ASPN). Os resultados mostraram que a ASPN pode melhorar as propriedades mecânicas como dureza, módulo de elasticidade e resistência a deslizamento adesivo na superfície do polímero investigado. Como resultado, as amostras tiveram a resistência ao desgaste melhorada em comparação ao material não tratado.

A nitretação a gás controlada e automática é apresentada por Liliental et al. (1999) como uma solução operacional fácil e econômica para promover as melhores características mecânicas superficiais das peças nitretadas, com a eliminação da excessiva fragilidade. Afirma-se que este processo supera o processo tradicional de nitretação a gás devido ao alívio, redução, ou mesmo eliminação, do fenômeno denominado “efeito de canto”. Este efeito pode trazer graves inconvenientes para o desempenho, por exemplo, de ferramentas de corte e é causado simultaneamente pela difusão de nitrogênio em duas direções convergentes, resultando na sobre-saturação deste e na severa precipitação de carbonitreto em contornos de grãos. Enquanto a difusão simultânea não pode ser evitada, a nitretação a gás controlada e automática, mediante adequado potencial de nitrogênio, pode superar esse problema fazendo os ajustes necessários durante a nitretação. Mostram-se ainda os efeitos deste tipo de nitretação na redução da fragilidade, resistência ao desgaste, resistência ao impacto, resistência à fadiga, resistência à corrosão e, principalmente, na redução dos custos do processo.

Outra forma de nitretação, a nitretação a laser, foi estudada por Schaaf et al. (2002). Pode ser descrita como a irradiação de superfícies metálicas por pulsos curtos de laser em atmosferas que contém nitrogênio, que pode melhorar as propriedades da superfície. É investigada a nitretação a laser do ferro, aço carbono, aço inoxidável e alumínio com a combinação de alguns métodos complementares, como análise do raio de íons, espectroscopia Mössbauer e difração de raio-X, profilometria da superfície e medidas de microdureza. Mostrou-se que a nitretação a laser é um processo complexo, composto de vários efeitos sobrepostos, tais como aquecimento, fusão e evaporação juntamente com transporte macroscópico de material. Foram desenvolvidos cenários para o processo de nitretação e os mecanismos de transporte de material e derivou-se uma simulação dos perfis de profundidade de nitrogênio para irradiações em um único ponto. Os resultados revelaram que, apesar da complexidade, o processo de nitretação a laser pode competir com os métodos convencionais por ser um processo muito rápido e que pode cobrir áreas amplas. No entanto, ele é restrito a superfícies com acessibilidade ótica, enquanto os processos de nitretação a gás e a plasma são mais flexíveis a este respeito.

Kostov et al. (2004) investigou a tecnologia de implantação de íons por imersão em plasma (PIII), que fornece a implantação de íons com uso moderado de energia (10–50 keV) e permite maior profundidade de penetração que a barreira de óxido na superfície. Observou-se que este tratamento é adequado para aço de ferramenta, mas não para ligas Al que sofrem mudança na fase de $\sim 350^{\circ}\text{C}$. Não foram observadas grandes melhorias nas propriedades tribológicas, mas sim melhoria significativa na dureza da superfície em aços e ligas Ti. Com PIII obteve-se uma camada dupla produzida com a zona de difusão profunda com dureza moderada e uma camada fina e muito dura no topo no AISI 304 tratado poderia ser útil para o alto desgaste e carga das aplicações industriais.

2.4. DUREZA

Dureza é uma propriedade mecânica relacionada à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca pontual. No caso dos metais, dureza pode ser descrita como a medida da resistência à deformação plástica. No entanto, esta definição pode variar. Para os metalúrgicos, dureza é a resistência a indentação; para os engenheiros projetistas é uma medida

de tensão de escoamento; para engenheiros de lubrificação, é a resistência ao desgaste e ao risco e, para engenheiros de usinagem, é a resistência ao corte (Lino, 2006).

DUREZA DE MATERIAIS DE USO CORRENTE	Vickers	Brinell	Rockwell	Mohs	Shore
			BC		
	2500			10 Diamante	
	2000			9 Corindun	
Carbonos sintetizados	1500				
	1000		70		100
Aços ferramentas temperados	900	700	65	8 Topázio	90
	800				80
	700	600	60		
	600	600			
	500	500	55	7 Quartzo	
	400	400	50		
			45		
Aços de construção tratados			40		50
			35		
	300	300	30	6 Feldspato	40
			25	5 Apatite	
			20		30
Aços recozidos	200	200	100	4 Espatoflúor	
			90		
Duraluminios				3 Calcite	
		80			
Bronzes		70			
Aços macios	100	100	60		
	90	90		2 Gesso	
	80	80			
	70	70			
Latões	60	60			
Cobres	50	50			
Ligas de alumínio	40	40			
	30	30			
	20	20		1 Talco	

Figura 2-4. Equivalência entre escalas de dureza (ASM, 2000).

A maior parte dos testes de dureza é baseada em alguma forma de indentação, por isso, o entendimento de teorias de plasticidade e elasticidade é essencial. Estas teorias podem ser complexas, parcialmente devido ao encruamento que ocorre quando uma indentação é feita.

Existem diversos tipos de teste para determinar a dureza, entre eles devem ser destacados os testes de indentação estática. Nestes testes, uma esfera, cone ou pirâmide de diamante, é forçado sobre o material que está sendo testado. A relação entre a força e a área ou profundidade da indentação apresenta a medida da dureza.

Existem dois métodos gerais para classificação dos tipos de testes de indentação disponíveis. A primeira é a obtenção da medida de dureza compelindo-se um indentador contra o material a ser analisado, com uma força especificada, e medir a profundidade de penetração ou a área deformada para determinar o valor da dureza. O ensaio Rockwell utiliza o método de profundidade de penetração, enquanto os testes Brinell, Vickers, Knoop e ultra-sônicos empregam a medida do diâmetro/diagonais para determinar a dureza. A equivalência entre as escalas de dureza é mostrada na Figura 2-4.

A segunda classificação do teste de indentação é governada pela carga aplicada no indentador. Desta forma, os testes podem ser classificados como de macro dureza ou de micro dureza. Detalhamento sobre os diferentes ensaios pode ser encontrado na literatura (ASM, 2000).

Conhecer a dureza de um material é importante para conhecer a resistência ao desgaste e, aproximadamente, a resistência mecânica através do uso de tabelas de correlação, bem como controlar a qualidade de tratamentos térmicos e em processos de conformação plástica em processo de ligação. (Prabhakaran, 2000)

Estudos têm comprovado o aumento da resistência à abrasão com o aumento da dureza dos materiais. Este comportamento é mais significativo em metais puros do que em aços tratados termicamente. Para o mesmo material, aços com maior porcentagem de carbono apresentam maior resistência à abrasão. A Figura 2-5 mostra que dureza é uma propriedade muito importante para prever o comportamento do desgaste abrasivo para diferentes metais puros e cerâmicas. No entanto, apenas dureza não é um indicador de resistência abrasiva quando comparamos diferentes grupos de materiais. (Rabinowicz, 1965)

O teste de dureza é utilizado, sobretudo, para fornecer informações sobre as propriedades mecânicas e caracterização dos materiais, como nos estudos de Cohen et al. (1999), Kamiya et al. (2004) e Li et al. (1999). É também utilizado na discussão do efeito das condições de deposição e dos instrumentos de indentação nos valores de dureza, mostrando a importância da geometria da ponta do indentador. Em Lemoine et al. (2004), é apresentado um protocolo da relação da inclinação da dureza quase independente da geometria da ponta.

Este ensaio pode, ainda, ser útil na validação de novas técnicas de avaliação de características mecânicas de materiais, como mostrado em Kamiya et al. (2004).

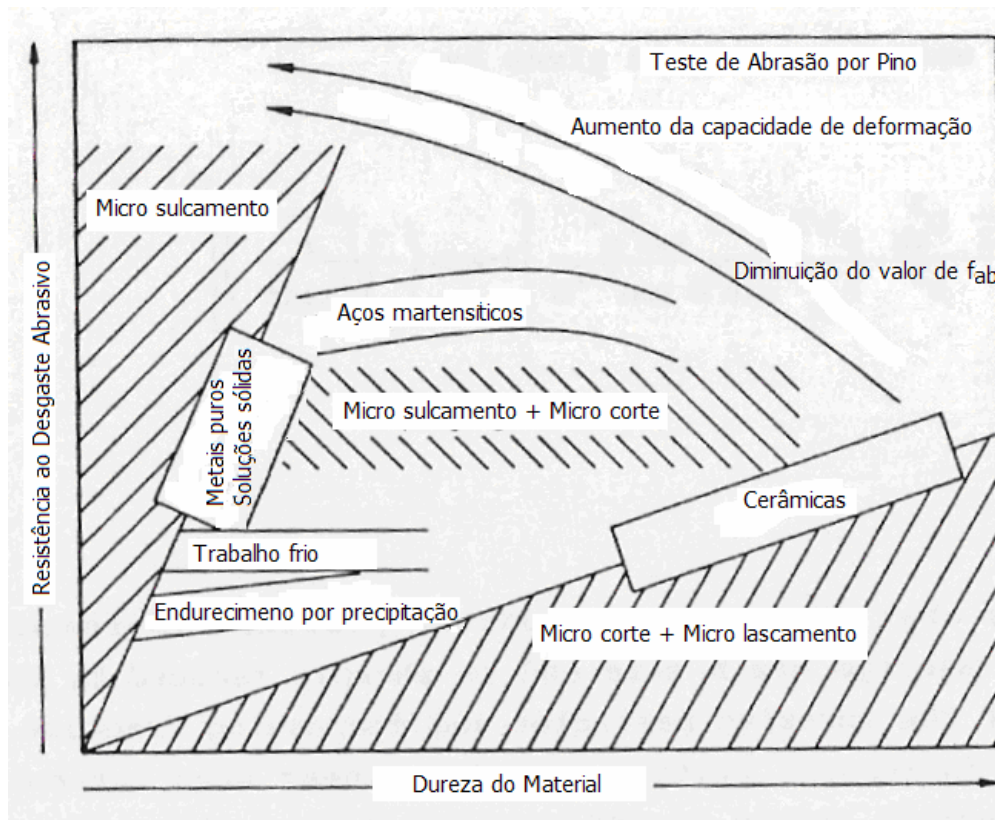


Figura 2-5. Resistência ao desgaste abrasivo de diferentes materiais (Rabinowicz, 1965)

2.5. ENSAIO DE RISCO

O ensaio de risco é um método utilizado para testar mecanicamente uma superfície, onde um elemento duro o suficiente para provocar um risco (identador), normalmente um diamante, é usado pressionado com certa carga sobre a superfície em estudo para gerar um sulco (ranhura). A carga também pode ser aumentada progressivamente durante o teste. (Kamminga et al., 2004)

Há registros de que no século XVII já se avaliava a dureza de pedras preciosas, esfregando-as com uma lima. No século XVIII desenvolveu-se um método para determinar a dureza do aço, riscando-o com minerais diferentes. Mas o primeiro método padronizado de ensaio de dureza do qual se tem notícia, baseado no processo de risco, foi desenvolvido por Mohs, em 1822. Este método deu origem à escala de dureza Mohs, que apresenta dez minérios-padrões, ordenados numa escala crescente do grau 1 a 10, de acordo com sua capacidade de riscar ou ser riscado.

Escala Mohs (1822)	
1	Talco
2	Gipsita
3	Calcita
4	Fluorita
5	Apatita
6	Feldspato (ortóssio)
7	Quartzo
8	Topázio
9	Safira e corindo
10	Diamante

Tabela 2-1. Escala de Mohs (ASM, 2000)

Esta escala não é conveniente para os metais, porque a maioria deles apresenta durezas Mohs entre 4 e 8, e pequenas diferenças de dureza não são acusadas por este método. Por exemplo, um aço dúctil corresponde a uma dureza de 6 Mohs, a mesma dureza Mohs de um aço temperado. As limitações da escala Mohs levaram ao desenvolvimento de outros métodos de determinação de dureza, mais condizentes com o controle do aço e de outros metais. (ASM, 2000)

Dureza ao risco é definida como a carga normal por unidade de área do suporte durante o risco, levando em conta a formação de cumes. Como é normalmente difícil medir a área de suporte durante o ensaio de risco, ela é calculada a partir da largura do risco obtido depois do ensaio.

Usando esta consideração, a dureza ao risco pode ser expressa em termos de comprimento do sulco, b , para qualquer configuração de ponta de risco bem definida. Esta expressão varia com a geometria da ponta. Para pontas de área de secção transversal circular (cones, esferas e parábolas) a equação é:

$$H_s = \frac{8F_N}{\pi b^2} \quad (2-1)$$

Para pirâmides de base quadrada:

$$H_s = 4 \frac{F_N}{b^2} \quad (2-2)$$

Uma das principais vantagens do ensaio de dureza ao risco é que para deformações pouco profundas é muito mais fácil medir precisamente a largura de um risco longo do que medir a diagonal de uma indentação. Assim, ensaios de risco apresentam melhores condições para avaliar estruturas pequenas e camadas de superfície muito finas.

Outra vantagem da dureza ao risco em relação à medida de dureza por indentação é a possibilidade de estudar as variações de dureza ao longo do risco. A dureza das diferentes fases (por exemplo, o perfil da dureza causado por deformação mecânica, ou até diferenças de dureza entre diferentes orientações cristalográficas) pode ser determinada por um único risco. Os valores absolutos em posições específicas podem ser calculados medindo a largura do sulco e aplicando a fórmula de dureza apropriada.

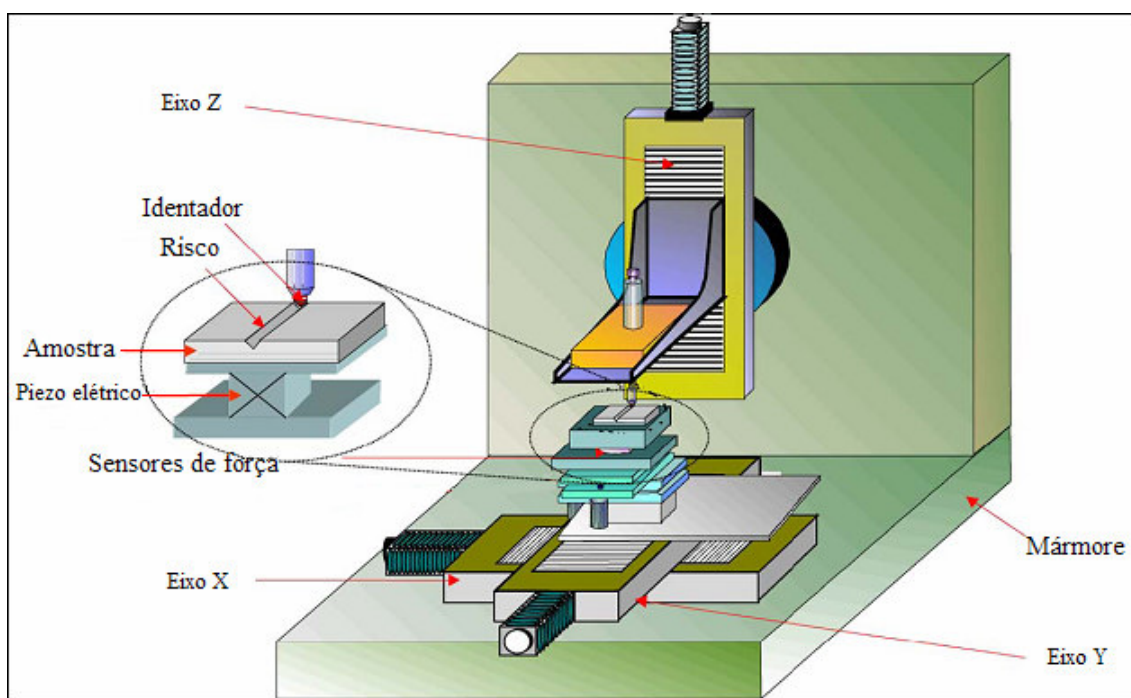


Figura 2-6 Esquema de funcionamento do ensaio de risco (Mezlini, 2004)

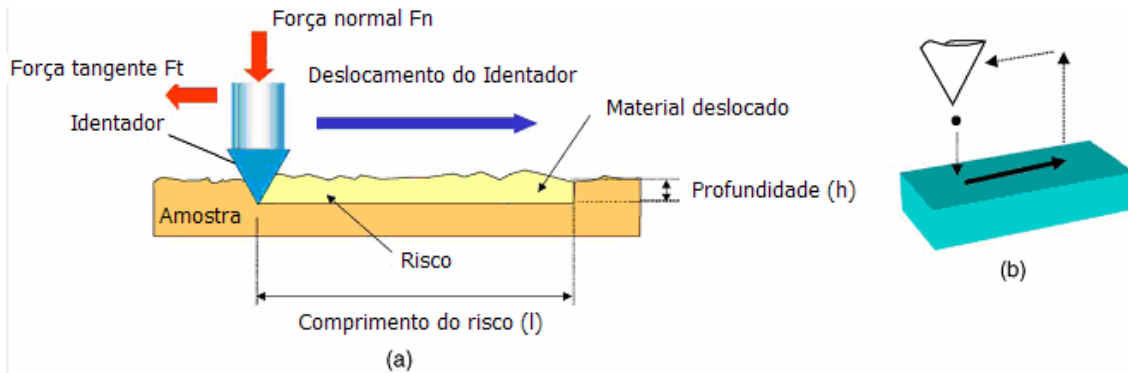


Figura 2-7 (a) Princípio de um ensaio de risco e (b) ciclo de deslizamento (Mezlini, 2004)

De acordo com as propriedades da superfície, a deformação pelo deslocamento do material pode ocorrer conforme mostrado na Figura 2-8 (Souza, 2004):

- Micro sulcamento: a ponta do indentador provoca deformações plásticas sem provocar perda de material que, deformado, flui lateralmente ou acumula-se na frente da partícula.
- Micro corte: a tensão cisalhante na frente das partículas abrasivas “arranca” fragmentos na forma de micro-cavacos.
- Micro lascamento: grandes fragmentos são subitamente arrancados da superfície da amostra devido à formação e propagação de trincas. Este mecanismo é restrito a materiais frágeis e ocorre quando as tensões produzidas pelas partículas abrasivas excedem os valores críticos.

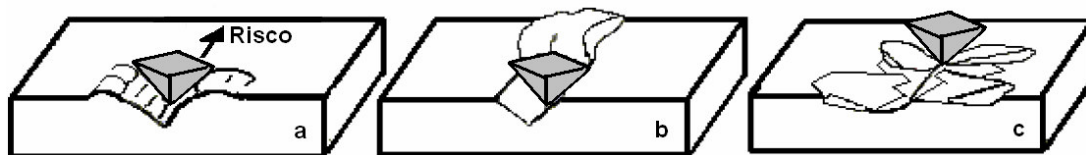


Figura 2-8. Modos de deformação (a) micro sulcamento, (b) micro corte, (c) micro lascamento (Aguila, 2005)

Os diferentes tipos de deformação que ocorrem são, então, associados à cargas críticas obtidas por uma inspeção visual da amostra depois do risco. Contudo, as dimensões da faixa e a força de fricção necessária para mover o indentador podem ser úteis na caracterização da superfície. (Kamminga, 2004)

À medida que o indentador fica mais afiado, a deformação plástica torna-se localizada na superfície e é mais fácil evitar a deformação plástica do substrato. Nestes casos, é mais fácil analisar e quantificar os resultados do teste. Contudo, o desgaste na ponta de diamante durante o teste torna-se muito mais significativo com o aumento da afiação. A escolha da ponta representa um ajuste entre o desgaste e a facilidade de análise dos dados.

Muitos dispositivos de ensaio de risco são equipados com medidores para monitoramento contínuo da força de fricção. Além disso, parâmetros como a profundidade de penetração e a emissão acústica também podem ser monitoradas.

O ensaio de risco de materiais pode ser realizado com vários objetivos que podem ser agrupados em quatro categorias principais:

- Avaliação da dureza ao risco
- Estudos de mecanismos de risco
- Medidas de resistência à abrasão
- Medição da adesão da camada (no caso de materiais revestidos)
- Tenacidade

Na literatura, encontram-se diversos estudos que utilizam o ensaio de risco na avaliação de revestimentos para qualificação de superfícies em revestimentos duros. A força de adesão nestes revestimentos foi estudada em Glozman et al. (1999) e Essen et al. (2004).

Segundo Rabinowicz et al. (1965), em um ensaio de risco a razão entre o volume de material real removido e o volume de material removido pelo risco pode ser descrito pela fração f_{ab} é definida por:

$$f_{ab} = \frac{A_V - (A_1 + A_2)}{A_V} \quad (2-3)$$

Onde A_V é a área de desgaste removida pelo risco medida na seção transversal e (A_1+A_2) são as áreas de material empurradas por deformação plástica para as bordas do risco. Valores de f_{ab} de 0,15 a 1 foram medidos experimentalmente para trinta materiais diferentes por Mewes e Zum Gahr (Rabinowicz, 1965) usando-se a seções transversais.

A Figura 2-9 mostra um modelo simples para descrição teórica da interação entre uma partícula abrasiva e a superfície de desgaste.

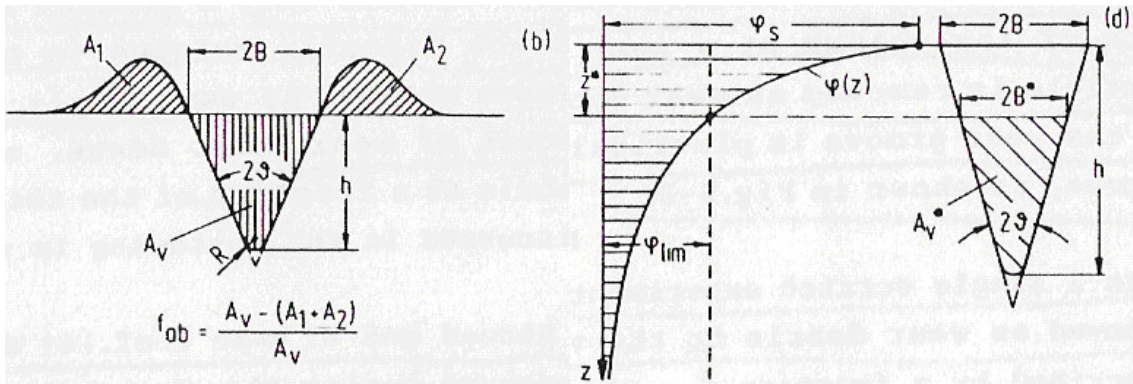


Figura 2-9. Secção transversal de um risco e definição do valor de f_{ab} (Rabinowicz, 1965)

Na Figura 2-10 o valor de f_{ab} foi correlacionado com a dureza para diversos materiais.

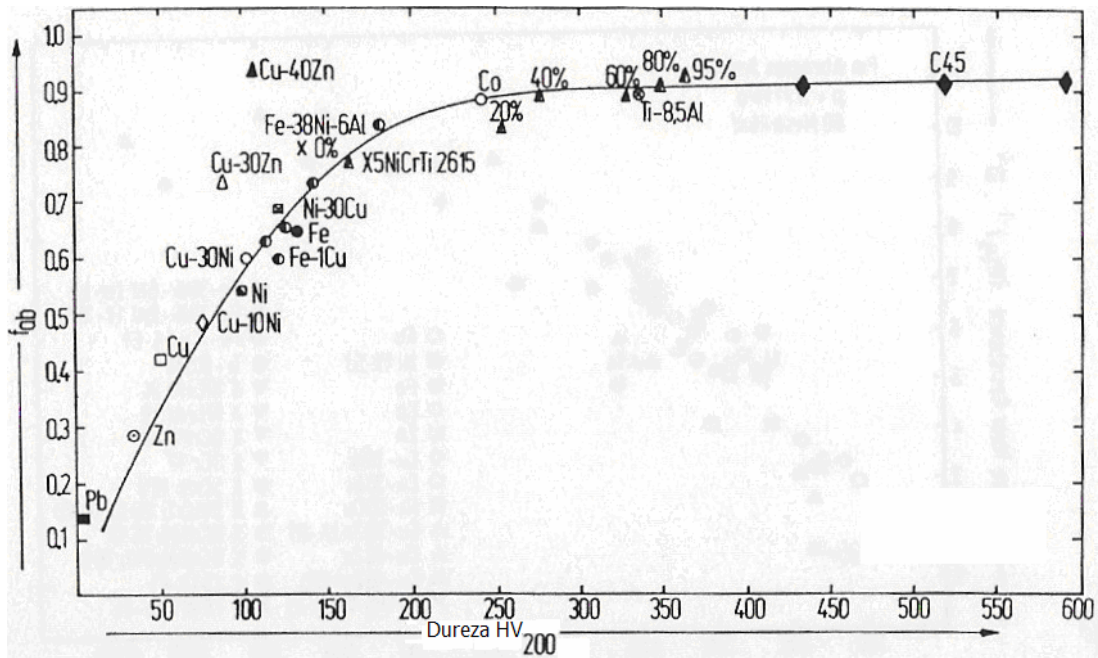


Figura 2-10 Correlação entre f_{ab} e dureza (Rabinowicz, 1965)

Na Figura 2-10 observa-se que com o aumento da dureza do material temos também o aumento do f_{ab} .

O modelo f_{ab} é muito útil para estimar o desgaste devido à ação do risco. A intensidade de desgaste volumétrico dividida pelo comprimento do risco pode ser calculada por:

$$\frac{W_V}{S} = f_{ab} \cdot A_V \quad (2-4)$$

A Figura 2-11 apresenta a relação entre dureza e f_{ab} em relação à resistência ao desgaste abrasivo para diversos materiais.

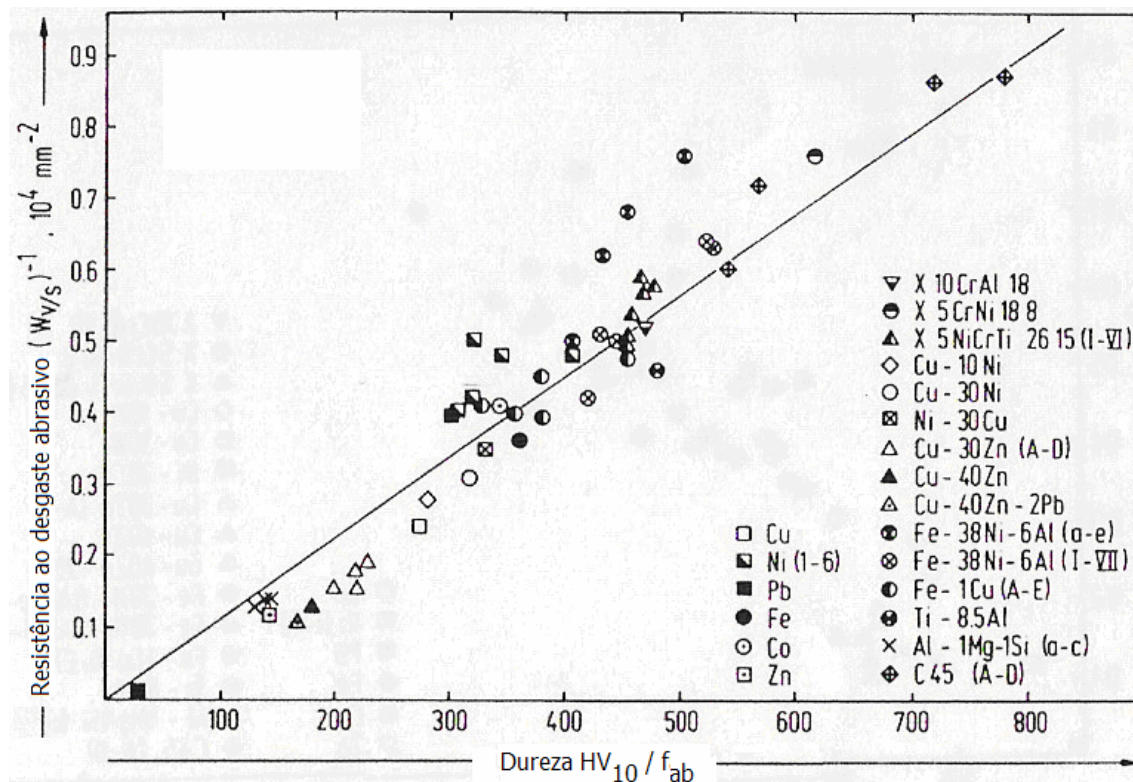


Figura 2-11 Razão da dureza por f_{ab} em relação à resistência ao desgaste abrasivo (Rabinowicz, 1965)

A Figura 2-11 mostra que quanto maior a razão entre a dureza e f_{ab} , maior é a resistência ao desgaste abrasivo.

2.6. DESGASTE POR DESLIZAMENTO

Desgaste é geralmente definido como uma perda progressiva ou desprendimento de material de uma superfície devido o movimento relativo entre uma superfície sobre outra. Não é considerada uma propriedade do material, mas sim um sistema de resposta. Qualquer material pode sofrer desgaste por uma grande variedade de mecanismos como adesão, abrasão, fadiga, erosão e oxidação influenciadas por fatores como a temperatura, condições de carga e superfície.

O teste de deslizamento tem sido utilizado tradicionalmente pelos engenheiros e cientistas de materiais para ordenar a resistência ao desgaste dos materiais com a intenção de aperfeiçoar a seleção de materiais ou desenvolver uma dada aplicação. Padronização, possibilidade de repetição, conveniência, pequeno tempo de teste e fácil medição são desejáveis nestes testes.

Um dos aspectos mais importantes do teste de deslizamento é a simulação das condições atuais de desgaste. Este requisito de entendimento não é apenas para uma determinada aplicação, mas também para o entendimento de vários mecanismos que resultam em desgaste.

Algumas classificações de desgaste devem ser desenvolvidas. As duas mais comuns são baseadas em mecanismos físicos de remoção de material ou desprendimento e mecanismos operacionais como ação mecânica (desgaste de rolamento, desgaste de escorregamento e etc.) e interação de materiais (metal X metal, metal X polímero e etc.). Estas duas classificações ilustram a complexidade do desgaste e a necessidade de um procedimento adequado.

O fenômeno de desgaste pode ser influenciado pela carga, meio ambiente e superfície além de outros fatores de testes como: equipamentos, geometria do contato, tipo de movimento, velocidade, condições do ambiente, lubrificante usado, preparação do material e da superfície e rugosidade da amostra. (ASM, 2000)

As propriedades tribológicas dos revestimentos podem ser caracterizadas por exemplo pelo ensaio de pino sobre disco, como em Essen et al. (2004), onde a área de desgaste foi medida com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura, e em Podgornik et al. (2001a), onde se testou a resistência ao desgaste em revestimentos nitretados a plasma. Comprovou-se em Podgornik et al. (2001b) que a nitretação a plasma melhora significativamente a resistência ao deslizamento.

A Figura 2-12 apresenta o esquema de funcionamento de um ensaio do tipo pino sobre disco.

O ensaio de deslizamento pode ainda ser usado para investigar as propriedades tribológicas da superfície trabalhada e de materiais não tratados, como em Esfandiari et al. (2006) e Sharma et al. (2003). Em Fu et al. (2004), ele é usado para provar que aumentando a dureza da superfície, a resistência ao desgaste pode ser melhorada.

Superfícies produzidas por nitretação a gás e em banho de sal foram comparadas quanto ao desgaste e atrito através da análise dos resultados produzidos nos ensaios de deslizamento em Maru et al. (1999).

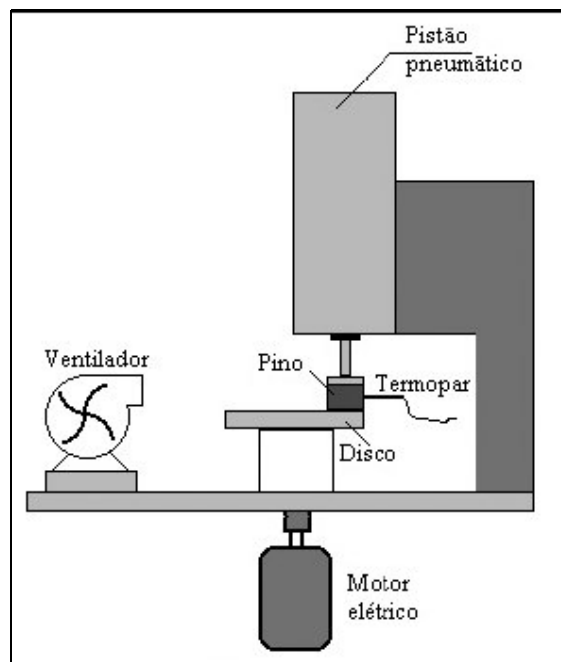


Figura 2-12 Esquema do funcionamento de um ensaio do tipo pino sobre disco (Tekeli, 2006)

2.7. DESGASTE ABRASIVO

O desgaste abrasivo pode ser definido como o deslocamento de material causado por partículas de elevada dureza, onde estas são forçadas contra e ao longo de uma superfície sólida. Quando uma ou mais partículas de elevada dureza são atritadas contra uma superfície, sulcando-a ou escavando-a devido à força normal aplicada, tem-se o desgaste abrasivo de dois corpos. Por outro lado, quando estas partículas são aprisionadas entre duas superfícies que deslizam entre si, pode ocorrer o chamado desgaste abrasivo de três corpos.

A Figura 2-13 mostra fatores importantes que influenciam a quantidade de desgaste abrasivo na prática. A influência das propriedades do material e parâmetros microestruturais são cruciais, pois estes fatores são particularmente importantes no contato de deslizamento a seco. Com o aumento da profundidade de indentação das partículas abrasivas, as propriedades volumétricas do material desgastado tornam-se mais importantes para a resistência ao desgaste.

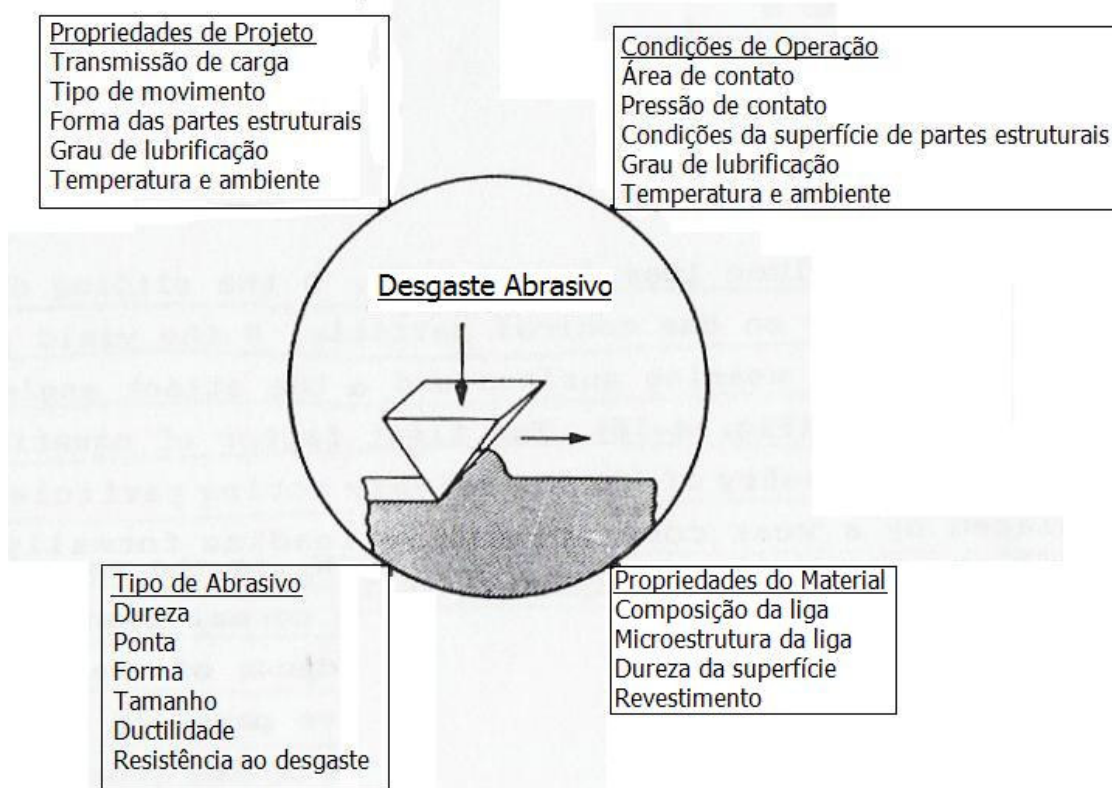


Figura 2-13. Fatores do sistema tribológico que influenciam no desgaste abrasivo.
(Rabinowicz, 1965)

Rabinowicz et al. (1965) propôs uma simples expressão para o volume de material removido durante a abrasão entre dois corpos por uma partícula abrasiva cônica.

$$\frac{W_v}{s} = \frac{2 \tan \alpha}{\pi} \cdot \frac{F_N}{H} \quad (2-5)$$

Onde, W_v é o volume de material perdido pelo desgaste, S é a distância de deslizamento, F_N é a carga normal sobre a partícula cônica, H é a dureza da superfície desgastada e α é o ângulo de ataque da partícula abrasiva. O primeiro fator da equação (2-5) depende da geometria da partícula abrasiva e pode ser reescrita pelo coeficiente de desgaste k_{ab} levando formalmente à lei de desgaste de Archard. (Rabinowicz, 1965)

$$\frac{W_v}{s} = k_{ab} \cdot \frac{F_N}{H} \quad (2-6)$$

A pré-condição para validar a equação (2-6) é a ocorrência de um micro corte ideal, isto é, todo o material do desgaste produzido é desprendido em um único passe da superfície do material desgastado. O fator chave para prever o desgaste abrasivo é o coeficiente de desgaste k_{ab} . Experimentos têm demonstrado valores de k_{ab} entre 10^{-2} e 10^{-3} .

O ângulo de ataque é definido como o ângulo entre a face principal da partícula abrasiva de contato e a superfície desgastada. Para diferentes materiais, os valores de α têm sido encontrados em média 45° para o cobre e 85° para o alumínio. (Rabinowicz, 1965)

Pavel et al. (2005) observou durante a abrasão de materiais macios que somente uma proporção do volume de desgaste produzido por uma partícula abrasiva é removida pelo desprendimento de partículas. O restante do volume de desgaste é plasticamente desprendido para as bordas do risco.

Os parâmetros que influenciam o processo de desgaste abrasivo são: carga, tamanho do grão abrasivo, dureza da partícula e temperatura. (Catai, 2004) As características e efeitos destes parâmetros devem ser conhecidos para melhoria no processo tribológico e aumento da vida útil de equipamentos e peças.

O comportamento de materiais em pó e revestimentos sob diferentes condições de desgaste abrasivo depende do tipo e da composição do material, bem como das condições do desgaste. (Kulu, 2005)

A resistência ao desgaste abrasivo pode ser usada para avaliar o desempenho de diferentes revestimentos, como, por exemplo, aspergidos (Dallaire, 2000), duros depositados por PVD (Berfhofer, 2006), por implantação iônica (Chiba, 1996), multicamadas (Bemporad, 2004), ou ainda, aplicados por HVOF (Lima, 2001).

Para analisar os efeitos da adição de diferentes elementos de liga, pode-se utilizar também a avaliação do desgaste abrasivo por três corpos, como em Kishore et al. (2005), onde se estuda os efeitos da adição de manganês em dois níveis diferentes a ligas ferrosas.

Outra aplicação do estudo do desgaste abrasivo é a análise do desgaste de ferramentas de corte, como em Pavel et al. (2005) e Yoshida et al. (2006).

A relação entre dureza e resistência ao desgaste para revestimentos duros foi o objeto de pesquisa em Prabhakaran et al. (2000). Em Lin et al. (2005), buscou-se estudar a mesma relação, mas utilizando-se material nitretado em vez de revestimentos duros.

A Figura 2-14 apresenta a relação entre a dureza do material e a resistência ao desgaste abrasivo para aços martensíticos e austeníticos.

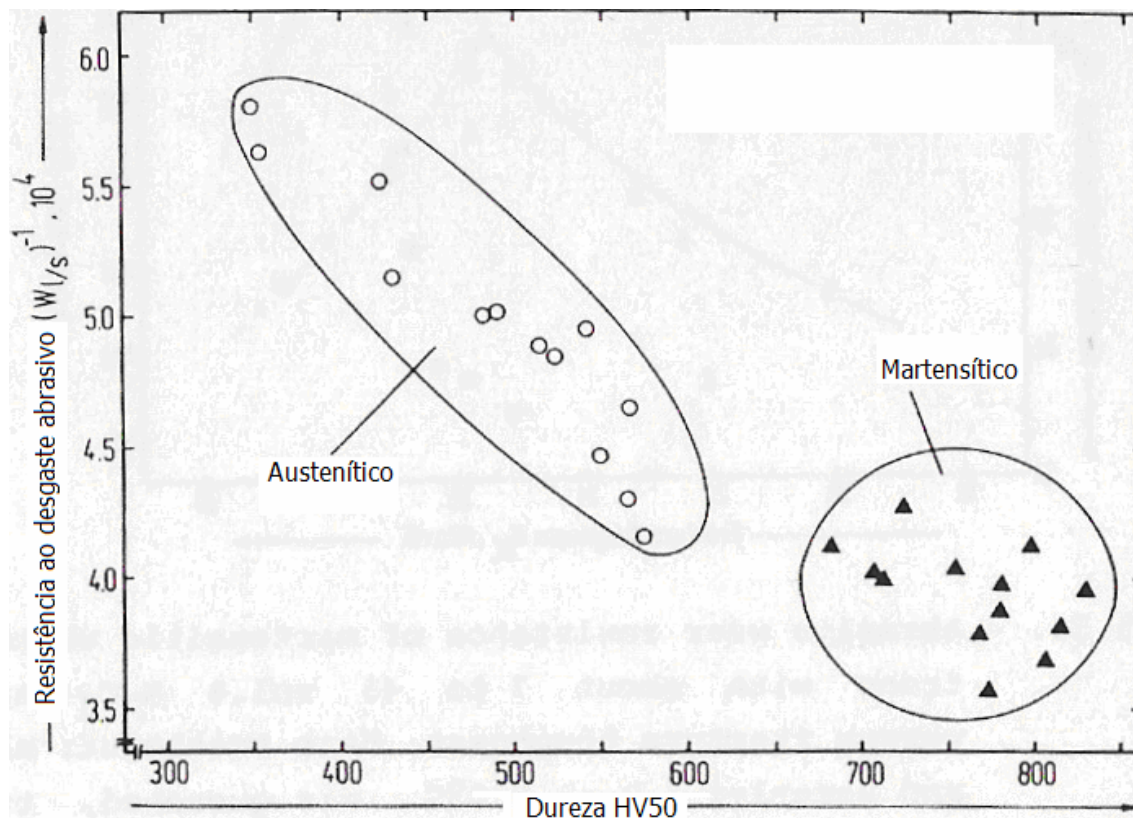


Figura 2-14 Relação entre dureza e resistência ao desgaste abrasivo para aços martensíticos e austeníticos (Rabinowicz, 1965)

Na Figura 2-14, observa-se que aços martensíticos resistem mais ao desgaste abrasivo do que aços austeníticos, isto se deve principalmente a maior dureza da martensita.

2.8. OUTROS TRABALHOS RELACIONADOS

A relação entre as características da superfície e desempenho ao desgaste ou risco tem sido estudada por diversos pesquisadores.

A importância relativa da espessura do revestimento e da profundidade da nitretação na resistência ao risco em revestimentos duplex foi estudada por Hoy et al. (2004). Depois de caracterizada por nanoindentação e ensaio de risco verificou-se que com o aumento na profundidade da nitretação, a carga suportada pelo revestimento duplex aumenta levando a um aumento significativo na dureza ao risco. O mesmo ocorreu com o aumento na espessura do revestimento. Concluiu-se, contudo, que como as duas operações têm efeito similar na dureza ao risco aparente, mas a taxa de deposição é relativamente menor quando comparada à

taxa de nitretação, aumentar a espessura do revestimento é um meio menos eficiente de maximizar a dureza ao risco.

Uma expressão analítica foi derivada para correlacionar a carga crítica da adesão do risco com a dureza e espessura de um filme duro e fino sobre substratos mais frágeis, com base no modelo B-R (Burnett, 1987) para interpretação das medidas de dureza do composto em Rodrigues et al. (2001). Esta expressão foi usada para calcular a correção da carga crítica com a dureza de Vickers para o substrato, dureza de Vickers para o compósito e espessura do filme. Os resultados foram comparados com dados experimentais para filmes TiN produzidos sob condições similares. A análise feita neste artigo busca mostrar resultados quantitativos que concordam em um grau satisfatório com os dados experimentais em todos os casos considerados e contribuir para o entendimento dos processos físicos que controlam a deformação do sistema mecânico sob condições de indentação de risco.

Diferentes mecanismos de desgaste foram observados em Mezlini et al. (2004) para mostrar a coexistência de desgaste abrasivo severo e brando em uma folha de liga de alumínio. Um ensaio de risco foi usado para simular o desgaste. Comparando experimentos e o modelo teórico, é mostrada uma correlação entre resistência ao desgaste abrasivo e dureza sob a superfície depois de sofrido o dano.

Os efeitos de ligas com fósforo e tratamento a calor na relação entre dureza e resistência ao desgaste de revestimentos Ni-P nano cristalinos e eletro depositados foram estudados por Jeong et al. (2003). Foram observadas relações lineares entre dureza e resistência ao desgaste.

A correlação da microestrutura com a dureza e resistência ao desgaste em compostos de superfície de aço Cr_3C_2 /inoxidável fabricados pela alta irradiação de energia do feixe de elétrons e reforço de partículas Cr_7C_3 foi investigado por Yun et al. (2005). Três misturas de pó foram colocadas sobre um substrato de aço inoxidável AISI 316L, que foi irradiado com o feixe de elétrons. A dureza e resistência ao desgaste da camada de composto da superfície foram influenciadas diretamente pelos carbeto duros Cr_7C_3 , e foram cerca de duas vezes maiores que aquelas do substrato de aço inoxidável.

Medidas para comparar a dureza ao risco com a dureza à indentação correspondente do chumbo, do cobre e do aço mole a temperatura ambiente foram feitas em Brookes et al. (1972). Os dois tipos de medida foram feitos usando o mesmo indentador cônico, e os efeitos de lubrificação, carga normal e ângulo da ponta foram investigados. Mostrou-se que os valores de dureza ao risco foram na maioria reproduzíveis quando medidos a ângulos de ponta de 120° - 170° . Os resultados encontrados para dureza ao risco não coincidiram com os

valores de dureza por indentação. As características de dureza do chumbo diferem de outros metais, onde a dureza ao risco foi geralmente de 1 – 6 vezes maior que a dureza à indentação e ambas as medidas foram independentes do ângulo do cone. Finalmente, a medida de dureza ao risco foi usada para demonstrar o maior grau de anisotropia observado em certos cristais, sob estas condições experimentais, comparada com a técnica de indentação.

Em Qian et al. (2004) estudou-se o comportamento de microdesgaste e dureza da liga superelástica níquel-titânio usando um triboindentador a várias temperaturas. Descobriu-se que a resistência ao desgaste diminui irregularmente com o aumento da dureza. As observações foram analisadas com base em uma simples teoria de contato. Esta teoria sugere que o aumento da dureza com a temperatura é principalmente devido ao um aumento na tensão na transição de fase, enquanto a diminuição da resistência ao desgaste é devido a um aumento do módulo elástico austenítico e a uma diminuição na quantidade de transição de fase que pode ser recuperada.

Para aplicação na área de odontologia, em Harrison et al. (1979) estudou-se a relação de dureza, módulo elástico e largura do risco como variáveis dependentes da resistência a abrasão de resinas acrílicas. A correlação múltipla R, quando todas as três variáveis são usadas como prognóstico, é 0.727. Devido às significativas correlações entre as próprias variáveis uma análise da regressão múltipla gradual mostrou a dureza como uma variável redundante. O desgaste abrasivo pôde ser estimado. Considerando $R=0.683$ e o desvio padrão de aproximadamente ± 50.3 . Os ensaios de abrasão e risco foram executados com métodos desenvolvidos pelos autores onde resultados de dureza e do módulo elástico foram obtidos de outros procedimentos padrão.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. METODOLOGIA

A metodologia adotada consistiu na seleção de três tipos diferentes de superfícies (aço SAE 4144 sem tratamento, aço SAE 4144 temperado e revenido, aço SAE 4144 temperado, revenido e nitretado). A composição do SAE 4144 pode ser observada na Tabela 3-1. Para caracterizar as superfícies foram coletados dados de dureza utilizando-se os métodos tradicionais de identificação, além de dados obtidos através do ensaio de risco (*scratch test*) e ensaios de desgaste por deslizamento adesivo e abrasivo. Todas as amostras foram observadas por microscopia ótica.

Tabela 3-1. Composição química do aço SAE 4144

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Si</i>	<i>Cu</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>
0,42 - 0,46	0,90 - 1,00	0,025	0,010 - 0,020	0,20 - 0,30	0,35	1,15 - 1,30	0,25	0,25 - 0,35
		max.			max.		max.	

Em um primeiro momento, as amostras foram cortadas em formato retangular conforme a Figura 3-1. Nas etapas seguintes foi necessário utilizar amostras com dimensões diferentes de acordo com cada ensaio.

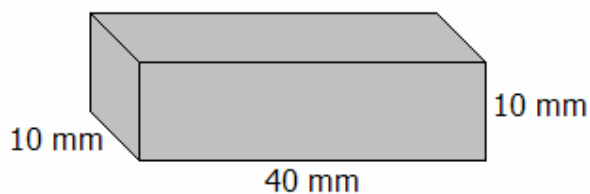


Figura 3-1. Representação esquemática da macrografia da amostra

As amostras foram temperadas e revenidas antes da nitretação com uma temperatura de austenitização de 850°C e a temperatura de revenimento de 600°C.

Os parâmetros de processo são apresentados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2. Parâmetros do processo

	<i>Temperatura(°C)</i>	<i>Tempo (h)</i>	<i>Concentração dos gases</i>
<i>Nitrocarburação</i>	570	4	4% CO ₂ – 96% NH ₃
<i>Nitretação à plasma</i>	520	24	100% N ₂

3.2. IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram identificadas da seguinte forma:

- 1 - Aço SAE 4144 sem tratamento (ST);
- 2 - Aço SAE 4144 temperado e revenido (TR);
- 3 - Aço SAE 4144 temperado, revenido e nitretado (TRN).

3.3. MICROESTRUTURA

Para que se possa observar as características das superfícies em estudo e confirmar os tratamentos térmicos realizados, realizou-se uma análise metalográfica das amostras em questão. Este estudo consiste nas seguintes etapas: preparação da superfície, ataque químico e observação ao microscópio.

3.3.1. Preparação da Superfície

CORTE

O corte metalográfico foi realizado em uma cortadeira de disco abrasivo com sistema de refrigeração (STRUERS – LABOTON 3). Os corpos de prova foram cortados em barras de seção retangular (25 x 20 mm).

EMBUTIMENTO

As amostras foram embutidas para avaliação de sua seção transversal utilizando baquelite. O método utilizado foi o embutimento a quente, realizado por uma prensa de embutimento (BUEHLER – SIMPLIMET 1000). Este processo é realizado para facilitar o

manuseio das amostras, devido o tamanho das mesmas, e para que os cantos vivos da amostra não rasguem as lixas e panos de polimento.

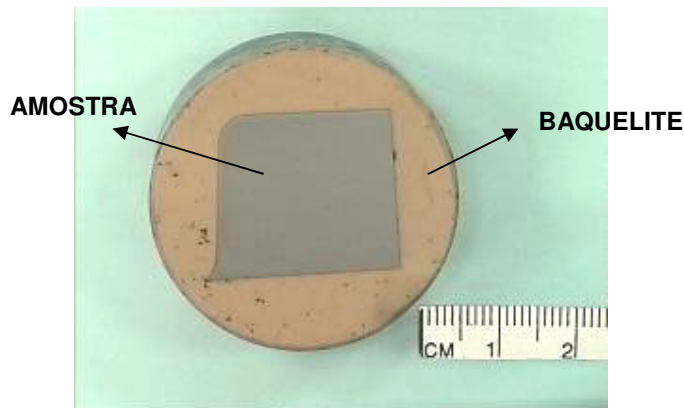


Figura 3-2. Amostra Metalográfica

LIXAMENTO E POLIMENTO

Foram utilizadas lixas de três granulometrias diferentes 220, 400, 600, da mais abrasiva para a menos abrasiva (STRUERS – ABRAPOL 10). Ao se passar de uma lixa para outra a amostra foi colocada em álcool para a remoção de partículas da lixa. Ao término do lixamento as amostras foram submetidas ao processo de ultra-som para a remoção de resíduos ainda presentes na superfície.

O polimento foi realizado em uma politriz motorizada (STRUERS ABRAPOL 10). A alumina em suspensão (Al_2O_3) foi utilizada como agente polidor.

3.3.2. Ataque Químico

O ataque químico é a técnica utilizada para revelar a microestrutura. A superfície polida reflete a luz uniformemente, sendo assim, oculta os detalhes da microestrutura. O ataque químico age como um contraste, neste caso foi utilizado Nital 2%.

As amostras foram imersas na solução durante 10s. Como há formação de bolhas de ar as amostras tiveram que ser agitadas para se assegurar que toda a superfície fosse atacada, caso contrário, as bolhas impediriam o ataque uniforme da superfície.

3.3.3. Microscopia Ótica

Toda a preparação da superfície da amostra descrita anteriormente ocorre para que se possa visualizar a microestrutura do material ao microscópio. O equipamento utilizado foi o microscópio Olympus modelo – BX51M. A análise da microestrutura utilizou ampliações de até 1000X.

3.4. DUREZA

Os ensaios de macrodureza e microdureza foram realizados como primeira avaliação das características mecânicas das superfícies.

O ensaio de microdureza foi realizado nas amostras metalográficas antes do ataque químico para maior precisão das medidas realizadas. O equipamento utilizado foi o microdurômetro Vickers Leco modelo – 875-045-910.

Foram realizados perfis transversais de dureza em cada amostra, sendo que a distância entre os perfis foi de 1 mm. A distância de 0,1 mm foi respeitada entre as identificações. A carga utilizada no microdurômetro foi de 10N. Os valores de dureza foram medidos na seção transversal até 1,5mm de profundidade para que fosse ultrapassada a camada branca no caso do material nitretado.

O ensaio de macrodureza (HRC) foi realizado na superfície externa da amostra utilizando um Durômetro Wilson modelo B524T.

3.5. ENSAIO DE RISCO

O ensaio de risco é constituído basicamente por três etapas: preparação das amostras, execução dos riscos e coleta dos resultados.

Para o estudo em questão foram planejados dois tipos de ensaio de risco diferentes.

No primeiro, realizado no equipamento CSM SCRATCH TESTER, utilizou-se um aumento progressivo da carga (2-150N) e no segundo, realizado no equipamento de risco desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Superfícies – UFPR, utilizaram-se cargas constantes de 60 e 100N. Em ambos os ensaios o comprimento do risco foi de 10 mm.

3.5.1. Preparação das Amostras

O material bruto foi medido e fixado na cortadeira de disco abrasivo com sistema de refrigeração (STRUERS – LABOTON 3). Após o corte, foram removidas as rebarbas para facilitar o manuseio. Antes do ensaio, as amostras foram limpas com álcool.

3.5.2. Riscos

Ensaio com Aumento Progressivo da Carga

O indentador foi montado no equipamento, ilustrado pela Figura 3-3, e este foi preparado para o ensaio.



Figura 3-3. CSM Scratch Tester

Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 3-3.

Tabela 3-3. Parâmetros do ensaio de risco com aumento progressivo de carga

Carga	2 a 150 N
Comprimento do risco	10 mm
Velocidade de risco	10 mm/min
Taxa de aplicação da carga	200 N/min
Ponta de diamante	0,2 mm

Os resultados foram obtidos utilizando-se o software do próprio equipamento de risco. Como resultado do ensaio, foi medido o coeficiente de atrito, a força de atrito e a profundidade de indentação.

Após o risco as amostras foram posicionadas ao microscópio óptico onde a medição da largura do risco e a captação das imagens foi realizada.

Ensaio com Carga Constante

O indentador foi montado no equipamento de risco do Laboratório de Engenharia de Superfícies - UFPR, ilustrado pela Figura 3-3, e este foi preparado para o ensaio.

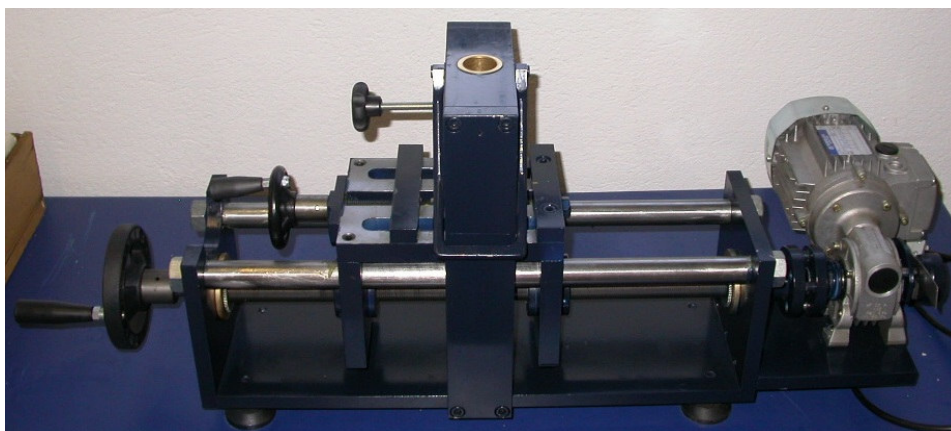


Figura 3-4. Equipamento de risco do Laboratório de Engenharia de Superfícies - UFPR

Após esta etapa, os parâmetros do ensaio foram ajustados, conforme mostrado na Tabela 3-4.

Tabela 3-4. Parâmetros do Ensaio com Carga Constante

Carga	60N	100N
Comprimento do risco	10 mm	10 mm
Velocidade de risco	10 mm/min	10 mm/min
Ponta de diamante	HRC	HRC

Para o ensaio com carga constante mediu-se o perfil do risco produzido sobre a superfície utilizando um perfilômetro do departamento de Física da UFPR. Com esta medição se torna possível obter a largura e profundidade do risco.

3.6. ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO ADESIVO E ABRASIVO

O ensaio de desgaste constitui-se basicamente do movimento relativo entre o corpo de prova e uma superfície. Para o aumento da intensidade do desgaste é aplicada uma carga normal à superfície de deslizamento.

Ensaio de desgaste tipo pino sobre disco foram realizados utilizando como pino o material em estudo e, como disco, o AISI 4340 com dureza de 57 HRC.

A Figura 3-5 apresenta o equipamento do tipo pino sobre disco desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia de Superfícies da UFPR.



Figura 3-5. Equipamento de desgaste do tipo pino sobre disco desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia de Superfícies da UFPR.

3.6.1. Preparação da amostra

O material foi fixado na cortadeira de disco abrasivo com sistema de refrigeração (STRUERS – LABOTON 3). As amostras foram confeccionadas medindo 5X10X10 mm (ALP). Após o corte, foram removidas as rebarbas para facilitar o manuseio. Antes do ensaio, as amostras foram limpas com a utilização de álcool.

3.6.2. Desgaste por deslizamento adesivo

No ensaio de desgaste por deslizamento adesivo tipo pino sobre disco a amostra em estudo foi fixada como pino e forçada sobre o disco metálico, garantindo-se o paralelismo entre as faces. Para realização do ensaio utilizou-se velocidade constante de 2m/s e cargas de 10 e 20N.

O ensaio foi realizado utilizando, para maior confiabilidade dos resultados, três corpos de prova para cada situação.

Nos ensaios de desgaste os pinos percorreram distância de 500, 1000, 2000 e 6000m. Após os ensaios avaliou-se a perda de massa em balança analítica de precisão 0,0001 g.

3.6.3. Desgaste por deslizamento abrasivo

Para o ensaio de desgaste por deslizamento abrasivo, o mesmo equipamento utilizado no ensaio anterior foi preparado fixando-se sobre a superfície do disco uma lixa 320 e posicionando-se o material a ser ensaiado como pino, garantindo-se o paralelismo entre as faces. Utilizou-se velocidade constante de 2m/s e cargas de 10N e depois 20N para aumentar a intensidade do desgaste. Os corpos de prova foram ensaiados em função da distância percorrida até uma distância total de 5000 m. Avaliou-se a perda de massa após 500, 1000, 2000 e 5000m. Antes e após cada ensaio, os corpos foram pesados para avaliar-se a perda de massa de material pelo desgaste, para isso utilizou-se balança analítica de precisão 0,0001 g.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. MICROESTRUTURAS

As microestruturas apresentadas e discutidas nesta seção foram produzidas para possibilitar a avaliação das estruturas presentes em cada superfície amostrada e auxiliar na caracterização da superfície quanto a dureza, risco e desgaste.

A Figura 4-1 apresenta as microestruturas da seção transversal das superfícies em estudo observadas nos microscópio óptico.

Observa-se no material sem tratamento (ST) a presença de ferrita e perlita, o que confirma que o material não apresenta tratamento térmico ou termoquímico. Por se apresentar em um estado sem beneficiamento é esperada a menor dureza superficial.

Nas micrografias do aço temperado (TR) observou-se a presença de martensita fina revenida, conforme esperado após o tratamento térmico de têmpera e revenido. A martensita é caracterizada principalmente por apresentar elevada dureza, desta forma, espera-se dureza superior com este beneficiamento em relação ao material sem tratamento. (ASM, 2000)

As microestruturas do material temperado, revenido e nitretado apresentam camada branca até 0,008 mm de profundidade, camada de difusão até 0,030 mm de profundidade e martensita fina revenida mais no interior. Sendo a camada branca uma camada extremamente fina e com elevada dureza, é esperada alta dureza superficial. Enquanto esta camada estiver presente, a camada de difusão onde se formam nitretos deverá apresentar dureza superior à amostra temperada. Resultado similar foi encontrado por Feder et al. (2006), onde foi comparado o processo de nitretação a plasma com o processo de nitretação a gás.

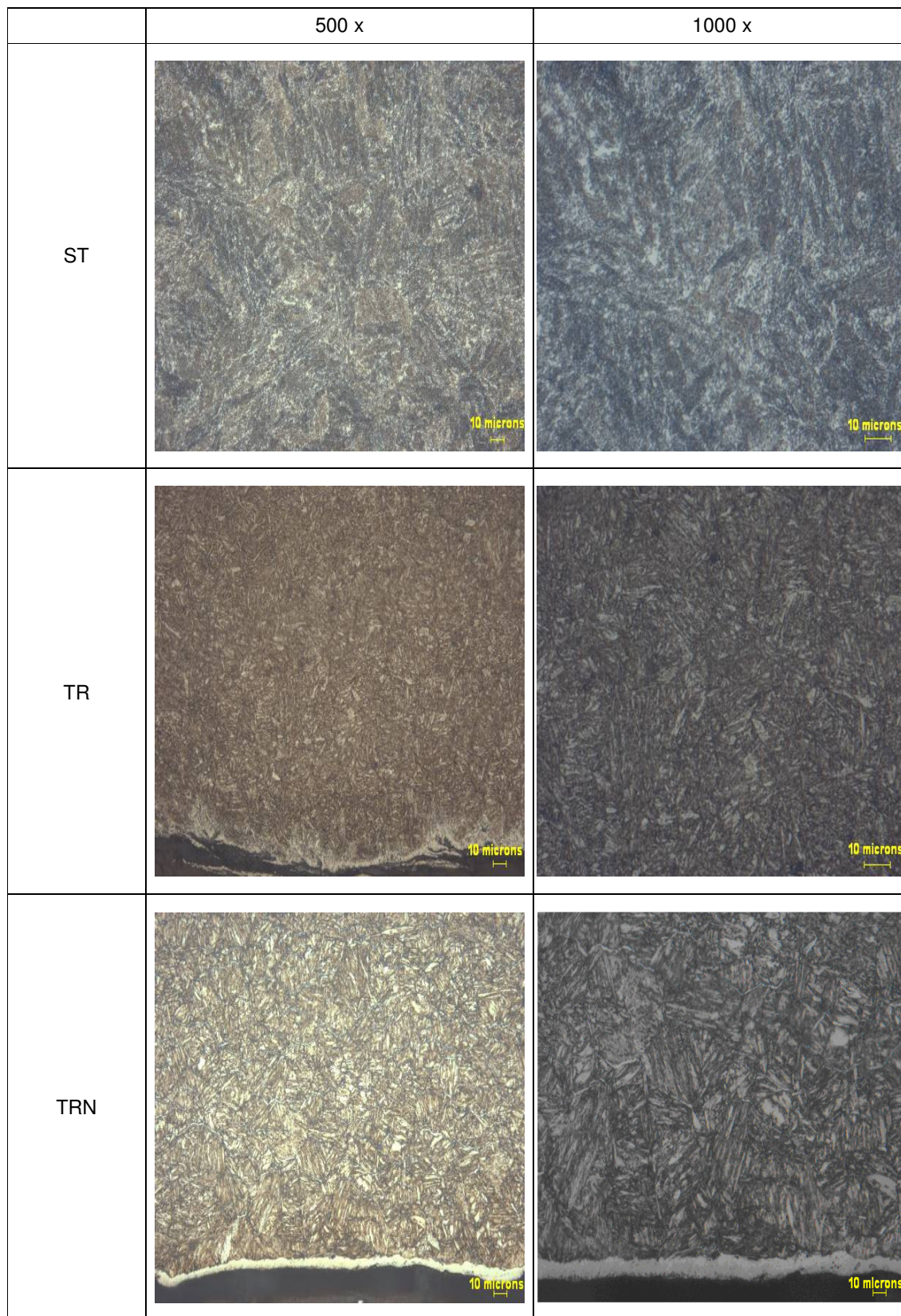


Figura 4-1. Microestruturas da seção transversal das superfícies em avaliação

4.2. DUREZA

4.2.1. Macro dureza

As medidas de dureza Rockwell C nas superfícies do aço SAE4144 testadas são apresentadas na Figura 4-2.

Os valores de macro dureza apresentados são coerentes com as microestruturas apresentadas. Ou seja, o aço SAE 4144 apresenta acréscimo de dureza devido ao seu beneficiamento por têmpera e aumento ainda mais significativo quando submetido ao tratamento termoquímico de nitretação. Em Podgornik et al. (2003d) o autor observou tendência semelhante ao avaliar a resistência ao desgaste de engrenagens nitretadas a plasma.

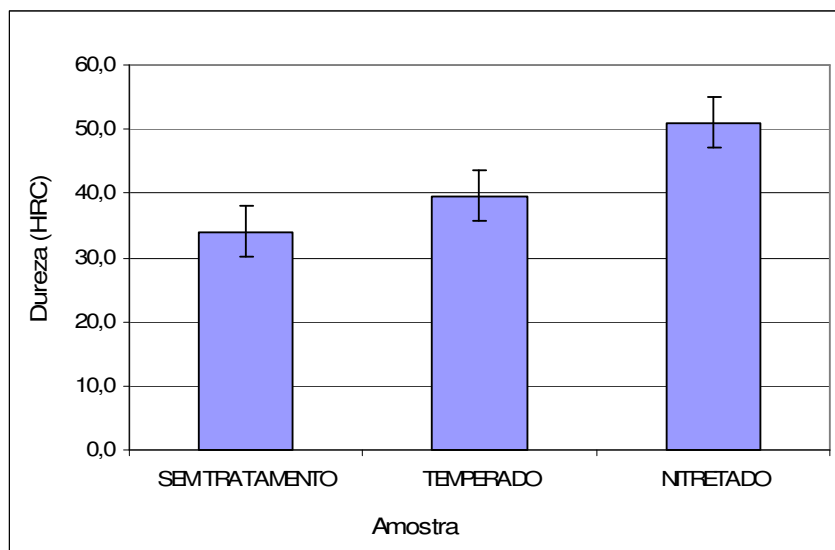


Figura 4-2. Macro dureza HRC

4.2.2. Micro dureza

A Figura 4-3 apresenta o perfil de micro dureza das superfícies avaliadas. Os valores de micro dureza comprovam a previsão inicial de comportamento da dureza ao longo da seção transversal para o aço SAE 4144 nas três condições, onde se observa diferentes durezas superficiais para os materiais em estudo.

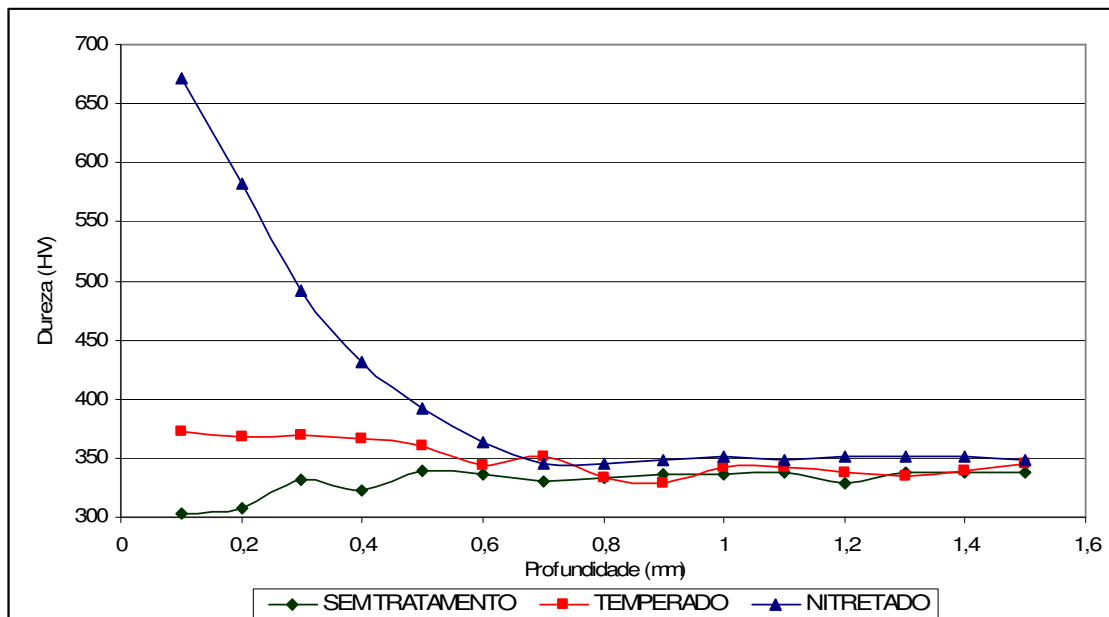


Figura 4-3. Perfil de dureza das amostras

Para o material nitretado observa-se a diminuição progressiva da sua dureza com a aproximação do seu núcleo, isto ocorre devido à elevada dureza observada na camada branca seguido da camada de difusão. Este resultado também foi observado por Podgornik et al. (2001b) no estudo sobre aços nitretados.

4.3. ENSAIO DE RISCO

4.3.1. Ensaio com Aumento Progressivo da Carga

Na Figura 4-4 apresenta-se a topografia dos riscos para as diferentes superfícies em função da carga. Observa-se que, com o aumento da carga, as características do risco são alteradas, sendo que a carga “crítica”, definida como a carga onde se iniciam as trincas, depende das características da superfície. Verifica-se que para o aço SAE 4144 sem tratamento, a partir de 75 N a superfície já apresenta trincas e arrancamento de material acentuado. Isto demonstra que a carga crítica para a utilização deste material já foi alcançada. Comportamento similar foi observado por Kamminga et al. (2003) na caracterização de revestimentos do tipo duplex. A camada de revestimento apresentou trincas e descolamento enquanto era aplicada a carga normal progressiva.

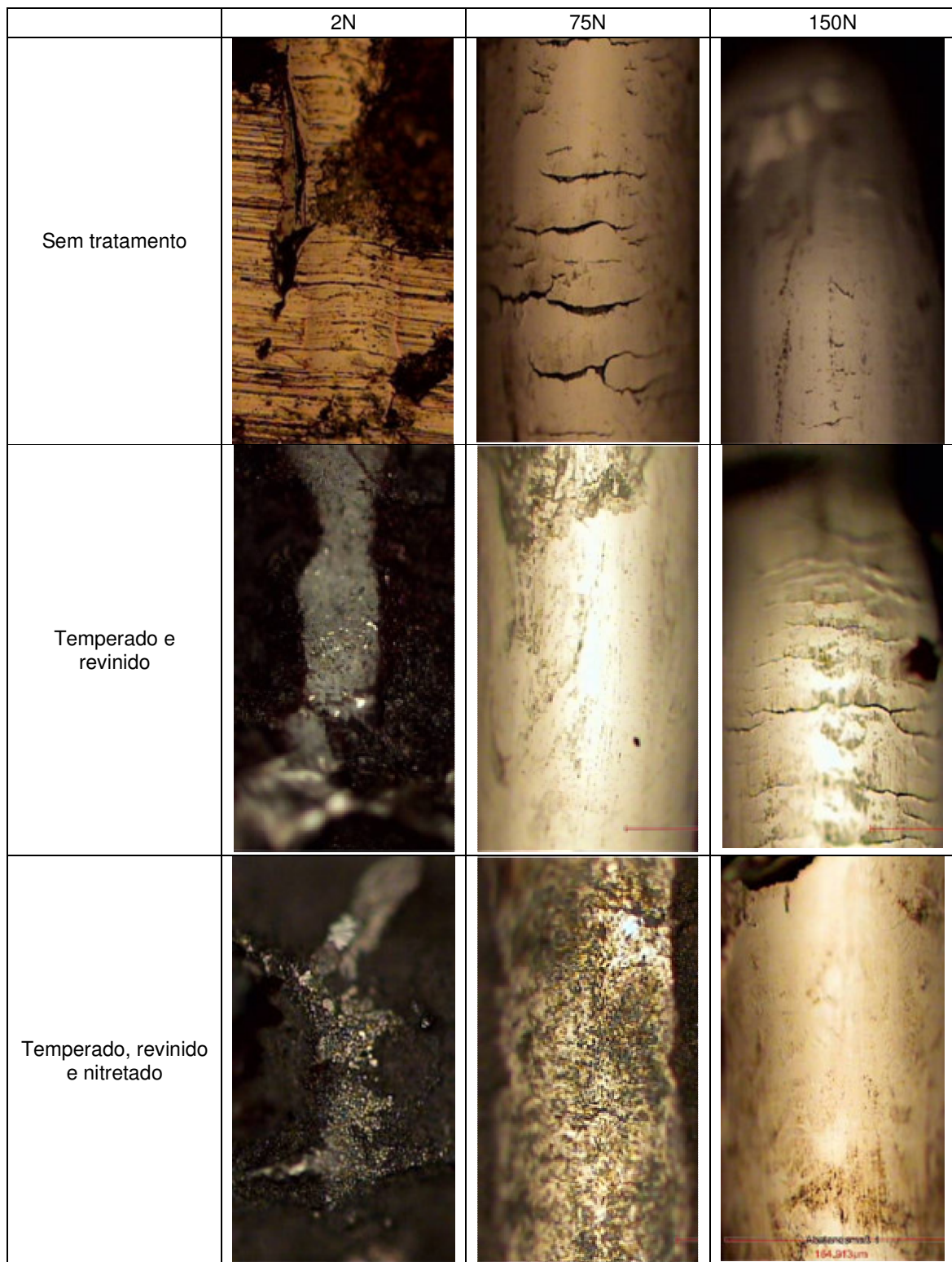


Figura 4-4. Microscopia do risco para diferentes superfícies

Para o aço SAE 4144 temperado e revenido observa-se uma melhora na resistência ao risco em relação ao material sem tratamento. As primeiras trincas ocorrem somente a 150 N, mesmo assim, não são tão acentuadas quanto no material sem tratamento.

No material nitretado observa-se uma elevada resistência ao risco. A 75 N a amostra apresenta-se ainda sem nenhum sinal de trincas ou arrancamento de material. Em 150 N percebe-se maior deformação, ainda assim, sem apresentar trincas ou arrancamento de material. O não aparecimento de trincas ou desgaste excessivo indica, segundo Stallard et al. (2005), que a superfície apresenta-se apta para a utilização até os níveis de esforços testados.

A Figura 4-5 apresenta um exemplo do registro de força normal, coeficiente de atrito, força de atrito e profundidade de indentação obtidos durante os ensaios de risco.

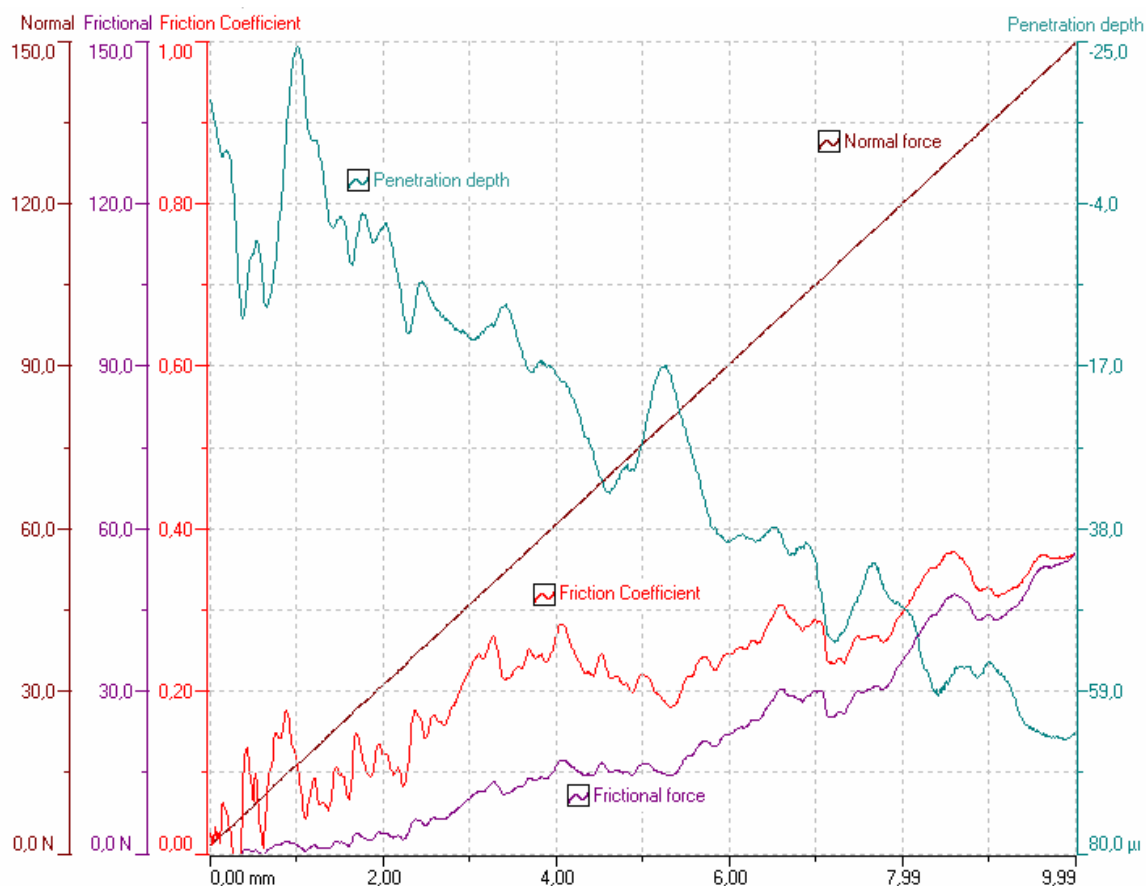


Figura 4-5. Exemplo de resultado obtido pelo ensaio de risco

A taxa de aplicação da força normal configurada foi de 200 N/min. Sendo esta taxa constante, a curva apresentada é uma reta de 45°. Esta configuração de ensaio também foi

utilizada por Podgornik et al. (2001a) no estudo de superfícies nitretadas em comparação a revestimentos duros.

O coeficiente de atrito é uma característica mecânica da superfície do material. Para o exemplo em questão, este coeficiente aumenta com a progressão da carga normal e da profundidade de indentação. O aumento no coeficiente de atrito ao longo do ensaio de risco com carga progressiva também foi observado por Kamminga et al. (2004) durante a caracterização e comparação de aços revestidos e nitretados.

Sendo a força de atrito dependente da força normal e do coeficiente de atrito, a curva da força de atrito apresenta tendência de crescimento à medida que a força normal aumenta.

A profundidade de penetração para o exemplo em questão aumenta gradativamente com a aplicação da carga normal. Isto é esperado, uma vez que existe o aumento da pressão de compressão sob o indentador e conseqüentemente sobre a superfície. No estudo da resistência de revestimentos de cromo de Hoy et al. (2004) este comportamento também pôde ser observado.

Na Tabela 4-1, são apresentadas a largura e a profundidade de penetração obtidas nos ensaios de risco com aumento progressivo de carga medidas no início e final do teste. Observa-se que para cargas pequenas a profundidade do risco não fornece informações “significativas” ao contrário da largura do risco e que para cargas elevadas a situação se inverte. Estes resultados também podem ser analisados na Figura 4-6 para a largura do risco.

Tabela 4-1. Largura dos riscos e profundidade de penetração

Amostras	Início do risco – 2 N		Final do risco – 150 N	
	Largura (µm)	Profundidade (µm)	Largura (µm)	Profundidade (µm)
Sem tratamento	63,659	4	164,912	73
Temperada	50,629	4	171,429	65
Nitretada	23,357	2	164,913	55

Verificou-se que no início do risco (2N) as amostras com dureza mais elevada proporcionam menor largura de risco. No entanto, à medida que a carga aumenta, a largura dos riscos tende a tornar-se muito semelhante para as três condições.

Este comportamento é esperado, pois o material nitretado apresenta camada branca de espessura 8µm, camada de difusão com espessura de 30µm e a profundidade do risco chega até 55µm para a carga final (150 N). A esta profundidade, a característica de dureza é muito semelhante à do material sem nitretação, como demonstrado pelos perfis de dureza, Figura

4-3. Uma comparação da largura do risco para diferentes cargas em revestimentos de TiN foi estudada em Stallard et al. (2005), onde observou-se que para cargas mais baixas, as amostras com dureza mais elevada resultam em menor largura do risco e, para cargas mais elevadas, ocorre o rompimento da camada ou o seu descolamento.

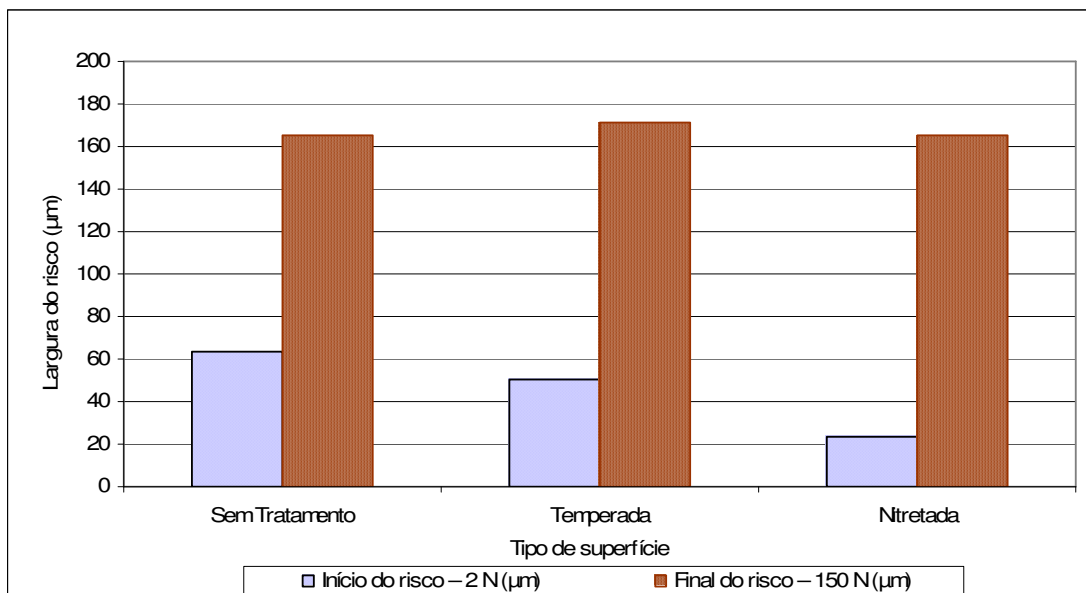


Figura 4-6. Largura do risco por carga aplicada

Os dados apresentados sugerem uma ligação direta entre os resultados do ensaio de risco e o ensaio de dureza. A Figura 4-7 apresenta a correlação observada entre dureza e risco.

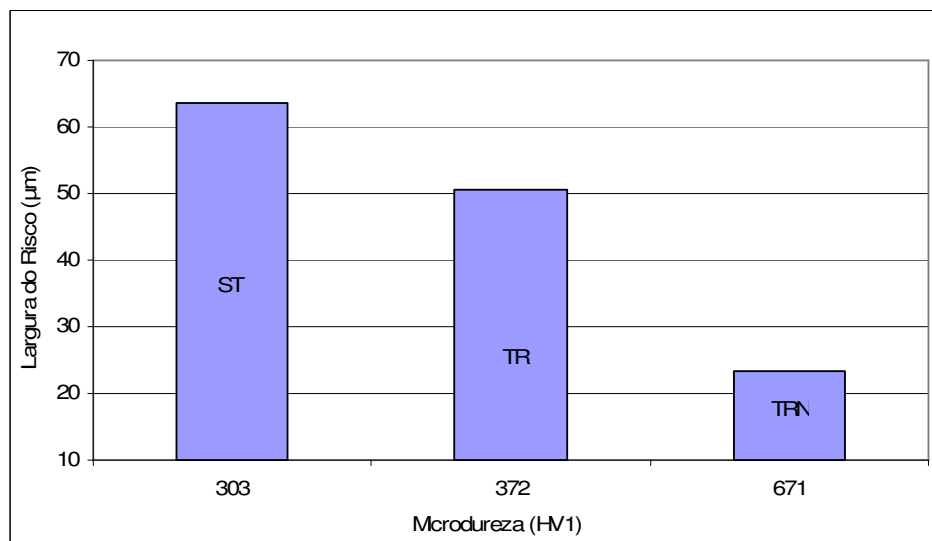


Figura 4-7. Correlação entre microdureza e largura do risco - 2N

É interessante notar que a correlação direta entre dureza e carga do risco para as superfícies em estudo não existe para todas as cargas estudadas, uma vez que a dureza varia com a distância da superfície externa. No entanto, considerando apenas as menores cargas, verifica-se que quanto maior a dureza, menor a largura do risco.

A mudança de comportamento com o aumento da carga aplicada pode ser compreendida correlacionando a profundidade do risco com as características iniciais da superfície, conforme mencionado anteriormente, Figura 4-8.

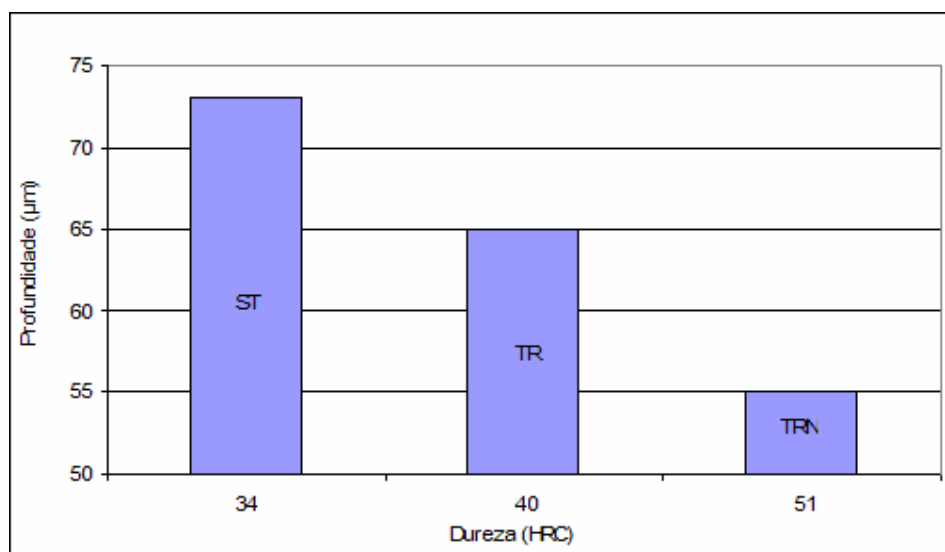


Figura 4-8. Correlação entre dureza e profundidade do risco – 150N

No resultado apresentado na Figura 4-8 observa-se que quanto maior a dureza da superfície, menor é a profundidade do risco. Hoy et al. (2004) utilizou a relação profundidade do risco x dureza na avaliação de superfícies revestidas por filmes duros sobre aço nitretado, tendo verificado que materiais mais duros apresentam maior resistência à penetração, confirmando a tendência observada.

4.3.2. Ensaio com Carga Constante

A Figura 4-9 apresenta o perfil transversal dos riscos com carga constante nas diferentes superfícies estudadas.

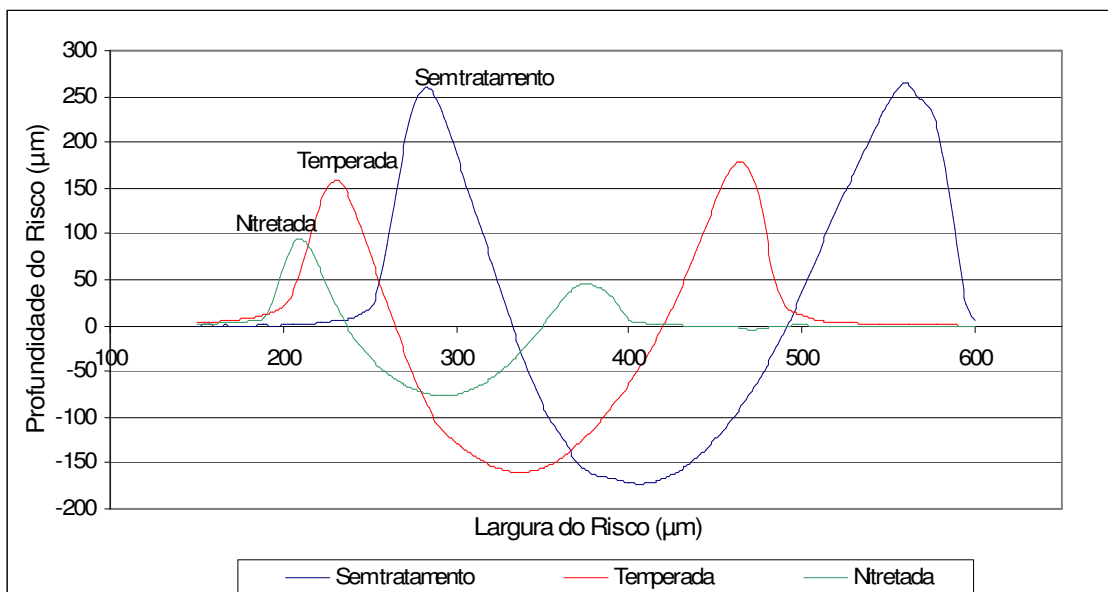


Figura 4-9. Perfil transversal do risco – 60N

Observa-se que a superfície sem tratamento tem muito material removido para as bordas, em consequência da grande deformação plástica e grande profundidade do risco. Em relação à superfície sem tratamento, a superfície temperada apresenta menor profundidade do risco e menor deformação plástica de material. Ao comparar-se a superfície nitretada com a temperada, observa-se que a superfície nitretada apresenta menor área de deformação plástica para as bordas e profundidade do risco foi menor.

Este resultado era esperado uma vez que materiais mais macios apresentam menor resistência à deformação e à remoção de material. Desta forma, é coerente que o material nitretado apresente o menor volume de material deformado e removido. Em Kamminga et al. (2006) observou-se resultado semelhante na comparação de aços sem tratamento, nitretado e nitretado revestido. Neste estudo o material como recebido apresentou maior deformação e profundidade do risco do que as superfícies nitretada e revenida.

O ensaio de risco com carga constante também foi utilizado no trabalho de Qi et al. (2006) para obtenção da largura e da profundidade do risco e, assim, prever o comportamento da resistência ao desgaste de diferentes materiais. Percebeu-se que revestimentos de TiC aspergidos resistem mais ao desgaste abrasivo quando apresentam menor largura e profundidade do risco.

Da mesma forma que no ensaio de risco com aumento progressivo de carga, os dados apresentados mostram relação com o ensaio de dureza. A Figura 4-10 apresenta a correlação entre a largura do risco e a dureza superficial para o ensaio com carga constante.

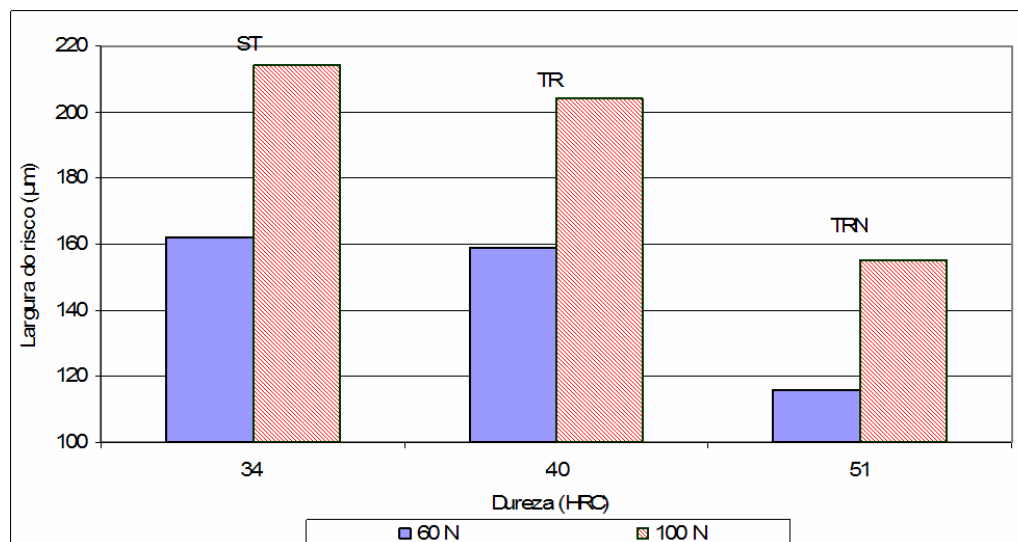


Figura 4-10 Correlação entre largura do risco e dureza superficial

Observa-se novamente uma redução da largura do risco com o aumento da dureza.

Para as cargas testadas e seguindo previsões da literatura a largura do risco é inversamente proporcional à dureza da superfície.

Observa-se que o gradiente de dureza medido nas superfícies testadas não afeta a relação observada uma vez que as medidas são sempre superiores àquelas das superfícies não tratadas ou temperadas e revenidas.

A presença de um “gradiente de dureza” aumentará a largura e profundidade do risco, quando comparado ao resultado de superfícies de dureza constante e de valor igual à maior dureza medida no gradiente.

A mesma relação é observada ao correlacionar-se dureza e profundidade do risco com carga constante. Na Figura 4-11 apresenta-se a relação inversamente proporcional entre dureza e profundidade do risco, observada para cargas constantes de 60 e 100 N. No trabalho de Mezlini et.al (2004) a correlação entre profundidade do risco e dureza também foi estudada para superfícies revestidas. Observou-se que os revestimentos danificados pela aplicação da carga apresentam decréscimo de dureza mais evidente do que os revestimentos sem trincas ou descolamento.

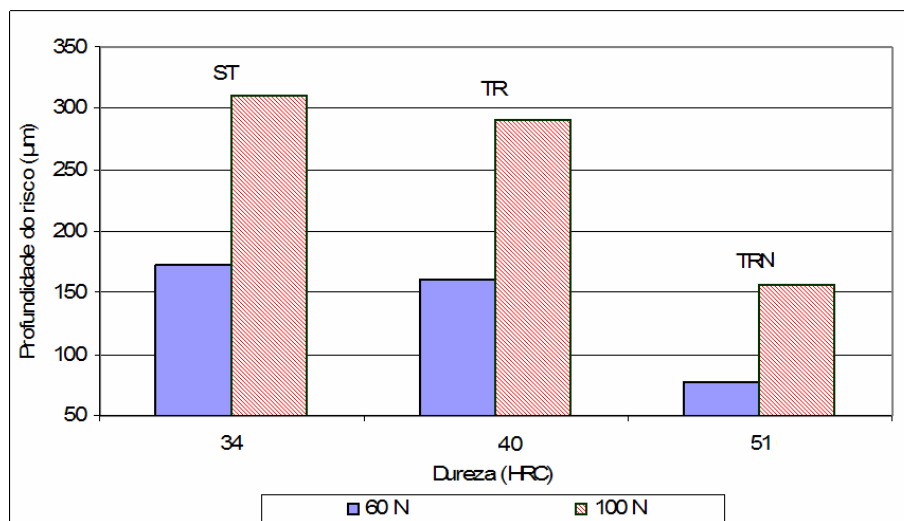


Figura 4-11 Correlação entre a profundidade do risco e a dureza

4.3. ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO ADESIVO

A Figura 4-12 mostra os resultados do ensaio de deslizamento adesivo em função da distância percorrida para a carga de 10 N. Comportamento similar foi observado para cargas maiores.

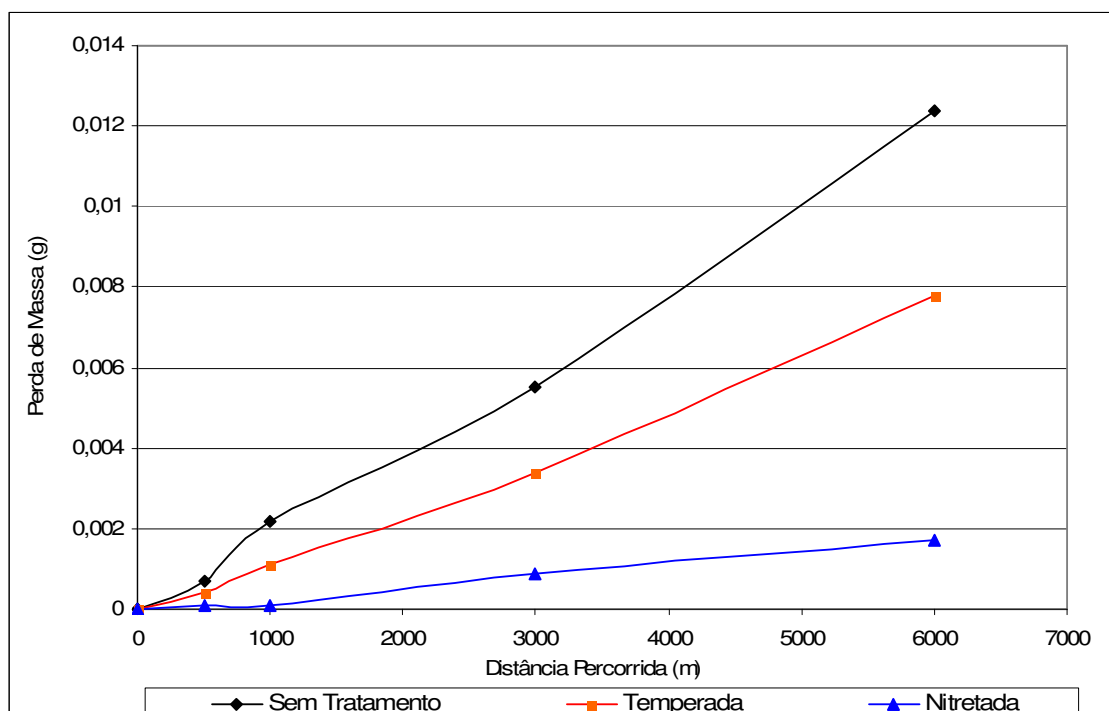


Figura 4-12. Perda de massa por distância percorrida para a carga de 10N

Verifica-se que, conforme esperado, com o aumento da distância percorrida, aumenta também a perda de massa. Quanto às características de superfície, o material sem tratamento apresenta desgaste mais acentuado que o material temperado, que, por sua vez, apresenta desgaste maior que o material nitretado. Desta forma, é possível afirmar que o beneficiamento do material aumenta sua resistência ao desgaste por deslizamento, sendo este inversamente proporcional à perda de massa.

O ensaio do tipo pino sobre disco para prever a perda de massa para diferentes tipos de superfície também foi utilizado por Podgornik et al. (2001b) em seu estudo sobre resistência ao desgaste de aços nitretados e revestidos, observou-se maior desgaste por deslizamento adesivo no aço nitretado no que no aço revestido com TiN.

De acordo com os resultados encontrados, é possível estabelecer uma correlação entre desgaste por deslizamento adesivo e dureza conforme já estudado na literatura (Rabinowicz, 1965). O comportamento de desgaste por deslizamento pode ainda ser correlacionado com a resposta das diferentes superfícies ao risco, especificamente com a profundidade do risco, 150N. Ambos podem ser observados na Figura 4-13.

Seguindo previsão da literatura Rabinowicz et al. (1965), observou-se que o aumento da dureza da superfície implica em uma redução na perda de massa por deslizamento adesivo. Resultado semelhante foi encontrado por Jeong et al. (2003) em seu estudo sobre correlação entre dureza e desgaste em revestimentos nanocristalinos eletrodepositados.

Observa-se que o aumento na profundidade do risco acompanha o aumento da perda de massa nas amostras ensaiadas, ou seja, a redução da resistência ao desgaste. Isto pode ser explicado pelo fato de riscos mais profundos ocorrerem em materiais mais macios e de os materiais mais macios estarem mais propensos à perda de massa durante o desgaste por deslizamento adesivo. Comportamento semelhante é observado em relação às características do risco com carga constante. Observa-se que a perda de massa por deslizamento adesivo é diretamente proporcional a profundidade e a largura do risco, e inversamente proporcional ao aumento da dureza.

O comportamento ao desgaste por deslizamento adesivo pode ser correlacionado com outras características da superfície, Figura 4-13.

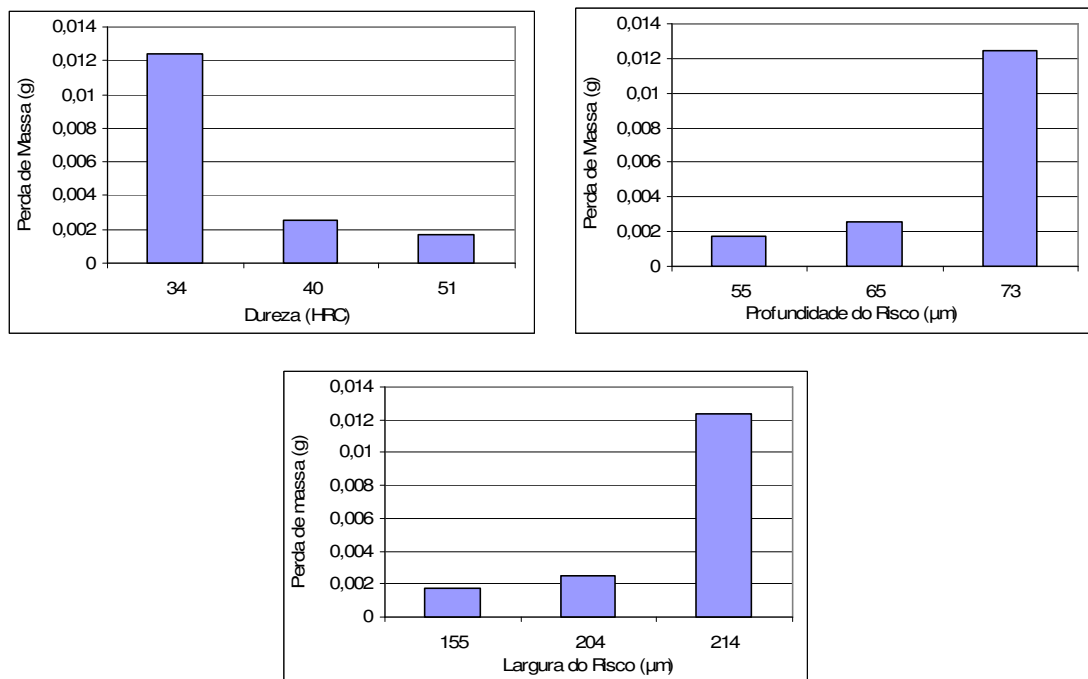


Figura 4-13. Correlação entre desgaste, dureza, largura e profundidade do risco

A correlação entre as medidas do risco (largura e profundidade) e o desgaste por deslizamento adesivo pode ser considerada uma relação entre a resistência à deformação da superfície e a sua resistência ao desgaste. Observa-se que o aumento da dureza da superfície implica em uma redução do desgaste adesivo, ou seja, redução da perda de massa.

4.4. ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO

A Figura 4-14 apresenta a perda de massa em função da distância percorrida para as amostras ensaiadas ao desgaste abrasivo.

Verifica-se que com o aumento da distância percorrida aumenta também a perda de massa. Comparando este comportamento com o ensaio de desgaste por deslizamento, as tendências são as mesmas, mas a perda de massa é mais significativa em função da maior agressividade da superfície. Quanto às características da superfície, o material sem tratamento apresenta desgaste mais acentuado que o material temperado, que, por sua vez, apresenta desgaste maior que o material nitretado. Desta forma, é possível afirmar que o beneficiamento do material, da mesma forma que no ensaio de deslizamento, aumenta sua resistência ao desgaste abrasivo, ou seja, a superfície com menor perda de massa tem maior resistência ao desgaste. No estudo comparativo das propriedades de desgaste de aços ferramenta Bourithis et

al. (2006) observou, usando também um ensaio do tipo pino sobre disco, que o material de maior dureza apresentou melhor resistência ao desgaste abrasivo.

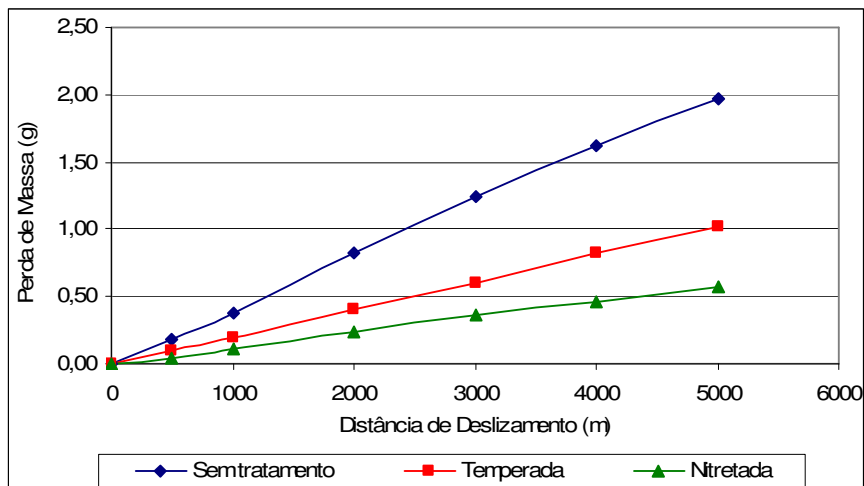


Figura 4-14. Perda de massa por distância percorrida para a carga de 10 N

Também o desgaste abrasivo pode ser correlacionado com as características da superfície medidas pela dureza, largura e profundidade do risco, Figura 4-15.

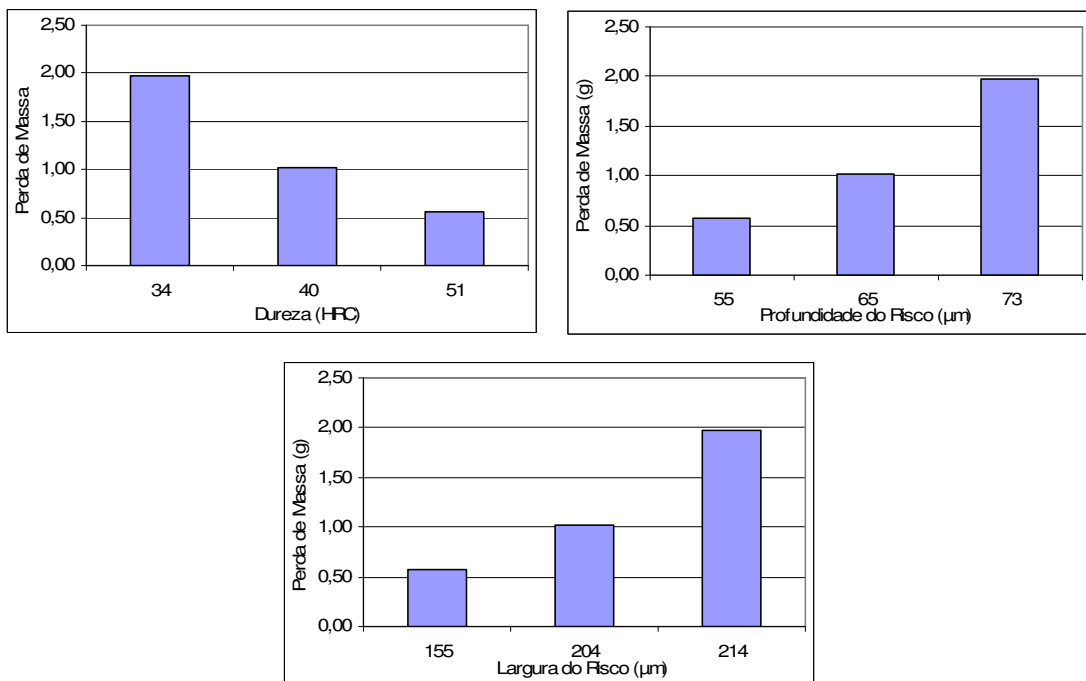


Figura 4-15. Correlação entre desgaste, dureza, profundidade e largura do risco

De forma semelhante ao observado no desgaste por deslizamento adesivo, profundidade e largura do risco são diretamente proporcionais à perda de massa no desgaste abrasivo e a dureza, inversamente proporcional. Observa-se que o aumento da dureza da superfície implica em uma redução do desgaste abrasivo, ou seja, redução da perda de massa, como relatado por Kawakame et al. (2006).

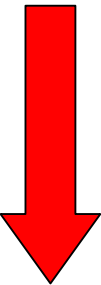
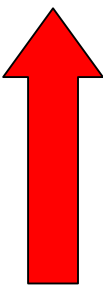
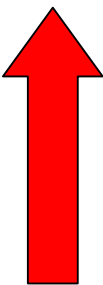
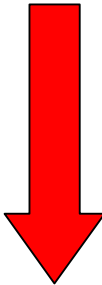
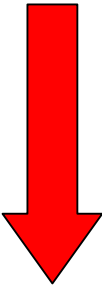
4.5. AVALIAÇÃO MECÂNICA DE SUPERFÍCIES

Tratamentos de superfícies para o aumento da vida útil e desempenho de componentes mecânicos são utilizados por diversas indústrias, que conseqüentemente procuram procedimentos para qualificação de seus componentes. Para tanto, existem diversas técnicas de avaliação mecânica disponíveis que podem estar diretamente relacionadas ou não com a solicitação a que os componentes estarão expostos em serviço. Com o intuito de desenvolver procedimentos de qualificação mecânica de superfícies, técnicas de dureza, risco (pela medida de sua largura e profundidade) e desgaste por deslizamento e abrasivo foram utilizados para caracterizar três superfícies distintas.

A correlação entre as diversas propriedades estudadas aparece na literatura. No entanto, percebe-se que os estudos englobam somente duas características distintas de cada vez e em situações muito específicas. No presente trabalho, buscou-se encontrar tendências de comportamento mais genéricas que possam auxiliar na caracterização rápida e eficiente de superfícies.

A Tabela 4-2 apresenta as principais tendências observadas, neste trabalho, para o aço SAE 4144 em diferentes fases de beneficiamento para este estudo.

Tabela 4-2. Principais tendências observadas

SUPERFÍCIE	DUREZA	RISCO		RESISTÊNCIA AO DESGASTE	
		LARGURA (60N)	PROFUNDIDADE (150N)	DESLIZAMENTO	ABRASIVO
Sem Tratamento					
Temperada e Revenida					
Temperada, Revenida e Nitretada					

Observa-se na Tabela 4-2 que o material sem tratamento, por apresentar menor dureza, sofreu maior deformação e remoção de material ao risco, além de ter apresentado maiores taxas de perda de massa por deslizamento e desgaste abrasivo.

Nota-se que à medida que o material é beneficiado (temperado e depois nitretado), a resistência ao risco e ao desgaste, seja ela por deslizamento ou abrasivo, aumenta.

A literatura apresenta uma correlação teórica entre desgaste abrasivo, dureza e risco. Rabinowicz et al. (1965) propôs a equação (2-4) para estabelecer uma correlação entre desgaste e risco e a equação (2-6) para estabelecer uma correlação entre desgaste e dureza.

Substituindo a equação (2-4) em (2-6), obtém-se:

$$\frac{W_v}{S} = f_{ab} \cdot A_v \quad (4-1)$$

$$\frac{W_v}{s} = k_{ab} \cdot \frac{F_N}{H} \quad (4-2)$$

$$k_{ab} = f_{ab} \cdot \frac{A_v \cdot H}{F_N} \quad (4-3)$$

Onde k_{ab} é a constante de desgaste, depende da partícula abrasiva; f_{ab} é a constante do risco, depende da área de material removido e deformado plasticamente; A_v é a área removida pelo risco; H é a dureza em kgf/mm^2 ; e F_N é a força normal aplicada à superfície.

A equação é válida para situações onde as cargas aplicadas são iguais para todos os ensaios (dureza, risco e desgaste). No entanto, isto exigiria impor restrições na correlação entre superfícies com diferenças de dureza significativas, já que cargas que riscam ou desgastam superfícies de menor dureza podem não ser adequadas para avaliar superfícies mais duras e vice-versa.

No entanto é necessário levar em consideração se o material apresenta ou não um gradiente de dureza e no caso afirmativo, o comportamento da superfície poderá variar quando exposta a uma solicitação abrasiva/deslizamento. Esta condição foi verificada no ensaio de risco, por exemplo, onde as superfícies apresentaram para cargas pequenas e médias um comportamento diferente daquele apresentado para cargas elevadas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

A utilização de diversas técnicas de caracterização de superfícies como base para prever a degradação de componentes em função de suas diferentes solicitações foi estudada para o aço SAE 4144 com diferentes beneficiamentos. As características mecânicas observadas nas superfícies foram avaliadas com o intuito de estabelecerem-se relações ou identificar tendências entre as diferentes técnicas de qualificação de superfícies com a finalidade de melhorar a compreensão e facilidade de obter informações necessárias para um procedimento de qualificação.

Para as condições testadas, é interessante destacar que a correlação direta entre dureza e carga do risco para as superfícies estudadas não existe para todas as cargas, uma vez que a dureza varia com a distância da superfície externa. No entanto, considerando apenas as menores cargas, é possível concluir que quanto maior a dureza da superfície, menor a largura e a profundidade do risco.

Na correlação entre desgaste por deslizamento adesivo e dureza, observou-se que o aumento na dureza da superfície implica em uma redução na perda de massa, o que indica uma maior resistência da superfície testada ao desgaste. Na correlação entre este tipo de desgaste e risco, foi possível observar que o aumento da profundidade e da largura do risco acompanha o aumento da perda de massa das amostras ensaiadas. Isto pode ser explicado pelo fato de riscos mais profundos ocorrerem em materiais mais macios e estes materiais estarem mais propensos ao desgaste.

Comportamento semelhante foi observado para os ensaios de desgaste por deslizamento abrasivo. No entanto, a perda de massa foi mais significativa neste ensaio devido à maior agressividade sofrida pela superfície da amostra.

Na tentativa de correlacionar dureza, risco e desgaste, verificou-se que à medida que a dureza da superfície aumentou, menor foi a largura e a profundidade do risco e maior a resistência ao desgaste, seja ele por deslizamento ou abrasivo. Este resultado foi observado tanto no ensaio de risco com carga constante quanto no ensaio com carga progressiva. No estudo da relação entre as diversas técnicas utilizadas constatou-se ainda que o comportamento de largura e profundidade do risco depende da carga aplicada. Isto é

particularmente importante para superfícies com gradiente de dureza, como observado na amostra temperada e nitretada. Desta forma, é importante que o responsável pela avaliação da superfície esteja treinado e apto para realizar esta avaliação.

Verifica-se que as diferentes técnicas fornecem informações complementares sobre o material. Uma técnica de caracterização de superfícies deve ser utilizada para complementar outra, mas não para substituí-la.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILA, Jaime F. V. **Avaliação de Revestimentos Resistentes à Corrosão e Desgaste, Aplicados por Aspersão Térmica ao Arco – Um Estudo para Proteção de Ponteiras de “Risers”**. Tese de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005. 92 p.
- ALVES Jr, Clodomiro. **Nitretação a Plasma - Fundamentos e Aplicações**. 01. ed. Natal: EDUFRN, 2001. 124 p.
- ASM Handbook Committee. **Mechanical Testing and Evaluation**. ASM Metals HandBook Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation, 2000.
- BEMPORAD, E., et al. **Characterisation and wear properties of industrially produced nanoscaled CrN/NbN multilayer coating**. Surface & Coatings Technology 188-189, 2004, p. 319 – 330.
- BERGHOFER, P. **Abrasion Resistance of Sputtered Hard Coatings**. Em www.proceedings.materialsweek.org/proceed/mw2000_435.pdf, acessado em 14/06/2006.
- BIEL, M., CZYRSKA-FILEMONOWICZI, A. **Correlation between microstructure and mechanical properties of nitrided Ti-6Al-7Nb alloy for medical applications**. Poster in “Microscopy of Tomorrow’s Industrial Materials” seminar, Berlin, October 3rd – 8th, 2005.
- BJÖRK, T. **Tribological aspects of aluminium extrusion dies**. Acta Universitatis Upsaliensis, Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 636, ISBN 91-554-50466, 2001.
- BOURITHIS, L., et al. **Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness**. In Tribology International 39, 2006, p. 479–489
- BROOKES, C. A., et al., **Some observations on scratch and indentation hardness measurements**. Journal of Physics D: Applied Physics 5, 1972, p. 1284 – 1293.
- BULL, S. J., BERASETEGUI, E.G. **An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing**. In Tribology International, 2005, p 1-16.
- BURNETT, P. J., RICKERBY, D. S. **Thin Solid Films 154**. 1987. p 403 – 416.
- CATAI, Rodrigo Eduardo, et al., **A influência dos mecanismos de desgaste abrasivo no processo tribológico dos materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos**. In 2 Congresso em Ciências de Materiais do Mercosul, Joinville, Santa Catarina, 2004. v. CD-ROM. p. 1 – 10.
- CHIBA, Yuji, OMURA, Toshio, ICHIMURA, Hiroshi. **Wear resistance of arc ion-plated chromium nitride coatings**. Journal of Materials Research, Vol. 8, No 5, p. 1109, 1996
- CHO, Chung-Woo, LEE, Young-Ze. **Effects of oxide layer on the friction characteristics between TiN coated ball and steel disk in dry sliding**. In Wear 254, 2003, p. 383 – 390.
- FÉDER, C. G, OLIVEIRA, A. S. C. M.; OGATA, H. **Avaliação do aço sae 4144 nitretado à plasma e nitrocarburizado**. In: 61 Congresso ABM, 2006, Rio de Janeiro. 61 Congresso ABM. São Paulo: ABM, 2006.

COHEN, L. J., et al., **Design and Fabrication of Materials for Laser Shape Deposition Manufacturing**. In 44th International SAMPE Symposium, Long Beach, Vol 44 (2), May 1999, p 1849–1856.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**, 7^a edição, 2002

DALLAIRE, S. **Hard Arc-Sprayed Coating with Enhanced Erosion and Abrasion Wear Resistance**. In Proceedings of the 2000 International Thermal Spray Conference, ITSC'2000, Montreal, Canada, 8-11 May 2000, ASM International, p. 575 – 582.

ESFANDIARI, M., DONG, H. **Plasma surface engineering of precipitation hardening stainless steels**. In Surface Engineering, Volume 22, No 2, April 2006, p. 86 – 92.

ESSEN, P. van, et al. **Scratch resistance and wear of CrN_x coatings**. Surface & Coatings Technology, September 2004.

FERREIRA, Bruna C., OLIVEIRA, Maria A. S. **Tratamento Termoquímico a Plasma de Aço-carbono**. Boletim técnico Petrobras 46 (1/2), Rio de Janeiro. Jan/jun 2003. p. 167 – 176.

FRANCO Jr, Adonias Ribeiro, et al., **The Use of a Vickers Indenter in Depth Sensing Indentation for Measuring Elastic Modulus and Vickers Hardness**. In Materials Research, Vol 7, No. 3, 2004, p 483 – 491.

FU, R. K. Y., et al., **Surface modification of cemented carbide using plasma nitriding and metal ion implantation**. In Surface & Coatings Technology 196, 2005, p. 150 – 154.

GLOZMAN, O., et al., **Study of the wear behavior and adhesion of diamond films deposited on steel substrates by use of a Cr-N interlayer**. In Diamond and Related Materials 8, 1999, p 859 – 864.

GODOY, C., et al, **Influence of plasma nitriding and PAPVD Cr_{1-x}N_x coating on the cavitation erosion resistance of an AISI 1045 steel**. In Surface & Coatings Technology, 2005.

GRACIOSO, José F. F. **Efeito das Condições de Têmpera na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de um Aço Inoxidável Martensítico Fundido CA6NM**. Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, fevereiro de 2003.

HAYDEN, H. W., MOFFATT, W. G., WULFF, J. **The Structure and Properties of Materials**, vol III, Wiley. 1965, p. 12.

HARRISON, A., HUGGET, R., HANDLEY, R. W. **A correlation between abrasion resistance and other properties of some acrylic resins used in dentistry**. PubMed, Vol 13 (1), Jan 1979, p 23 -34.

HIRSCHHEIMER, Luiz Roberto. **Austêmpera**. <http://www.brasimet.com.br/artigos/Austempera.pdf>, acessado em 29/05/2006.

HOY, R., KAMMINGA, J. D., JANSSEN, G. C. A. M. **Scratch resistance of CrN coatings on nitrided steel**. In Surface & Coatings Technology, 2004.

JEONG, D. H., et al. **The relationship between hardness and abrasive wear resistance of electrodeposited nanocrystalline Ni-P coatings**. Scripta Materialia 48. 2003. p 1067 – 1072.

KAMIYA, S., et al, **A comparative study of the mechanical properties of PVD coatings evaluated by new techniques and conventional methods**. Thin Solid Films 469-470, November 2004, p 248 – 253.

- KAMMINGA, J. D., ALKEMAND, P. F. A., JANSSEN, G. C. A. M. **Scratch test analysis of coated and uncoated nitrided steel.** In Surface and Coatings Technology 177 – 178, 2004, p 284 – 288.
- KAPCZINSKI, Myriam Pereira, et al., **Surface Modification on Titanium by Plasma Nitriding.** In Materials Research, Volume 6, No 2, 2003, p. 265-271.
- KAWAKAME, M. , BRESSAN, J.D. **Study of wear in self-lubricating composites for application in seals of electric motors .** In Journal of Materials Processing Technology, 2006
- KISHORE, *, SAMPATHKUMARAN, P., SEETHARAMU, S. **Erosion and abrasion characteristics of high manganese chromium irons.** In Wear 259(1-6), August 2005, p 70 – 77.
- KOSTOV, K. G., et al. **Surface modification of metal alloys by plasma immersion ion implantation and subsequent plasma nitriding.** Surface & Coatings Technology 186, 2004, p 204 – 208.
- KULU, Pritt, TARBE, Riho, VALLIKIVI, Ahto. **Abrasive Wear of Powder Materials and Coatings.** ISSN 1392–1320 Materials Science (MEDZIAGOTYRA), Vol 11, No. 3, 2005.
- LEMOINE, P, et al. **Comparing hardness and wear data for tetrahedral amorphous carbon and hydrogenated amorphous carbon thin films.** Wear 257, January 2004, p 509 – 522.
- LI, Xiao Chun, STAMPFL, Jurgen, PRINZ, Fritz B. **Design and Fabrication of Materials for Laser Shape Deposition Manufacturing.** 44th International SAMPE Symposium, May 1999, Vol 44 (2), p 1849 – 1858.
- LI, C. X., BELL, T. **Potential of plasma nitriding of polymer for improved hardness and wear resistance.** Journal of Materials Processing Technology (2005), 168 (2), p 219–224.
- LILIENTAL, Witold K., TYMOWSKI, George J., TARFA, Nabil. **Bringing out the Best Properties of Nitrided Layers through Controlled Gas Nitriding.** Technical Papers – Society of Manufacturing Engineers, 1999.
- LIMA, Carlos R. C., CAMARGO, Flávio. **Estudo e Caracterização de Revestimentos para Desgaste Aplicados por Aspersão Térmica a Chama Oxidável de Alta Velocidade – HVOF.** 1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, COBEF 2001, Anais do 1º COBEF, v 01, p. 1 – 8.
- LIN, Jen Fin, et al., **The effects of differing nitrogen implantation conditions on penetration depth, mechanical properties, and tribological behavior of plasma-nitrided AISI 304 stainless steel.** Surface & Coatings Technology 197, September 2004, p 28 – 38.
- LINO, F. J. **Ensaio de Dureza.** <http://paginas.fe.up.pt/~falves/Ensaiodureza.pdf>, acessado em 13/04/2006
- LOGANATHAN, C., NARAYANASAMY, R., SATHIYANARAYANAN, S. **Effect of annealing on the wrinkling behaviour of the commercial pure aluminium grades when drawn through a conical die.** In Materials and Design 27, 2006, p. 1163–1168
- MAHBOUBI, F., FATTAH, M. **Duplex treatment of plasma nitridin and plasma oxidation of plain carbon steel.** In Vacuum 79, January 2005, p 1 – 6.
- MARU, M. M., SINATORA, A. **Comparativo do desgaste por deslizamento de camadas nitretadas de gás e em banho de Sal.** VII Simpósio de Iniciação Científica da USP, 1999.

- MEZLINI, S., et al. **Abrasions of aluminium alloy: effect of subsurface hardness and scratch interaction simulation.** *Wear* 257. 2004. 892 – 900.
- NOORDIN, M.Y. **Dry turning of tempered martensitic stainless tool steel using coated cermet and coated carbide tools.** In *Journal of Materials Processing Technology*, 2006
- PAVEL, Raul, et al. **Effect of tool wear on surface finish for a case of continuous and interrupted hard turning.** In *Journal of Materials Processing Technology* 170, 2005, p. 341 – 349.
- PODGORNIK (a), Bojan, et al., **Tribological properties of plasma nitrided and hard coated AISI 4140 steel.** In *Wear* 249, 2001, p. 254 – 259.
- PODGORNIK (b), Bojan, VIZINTIN, Joze **Sliding and pitting wear resistance of plasma and pulse plasma nitrided steel.** *Surface Engineering*, Volume 17, No 4, 2001, p. 300 – 304.
- PODGORNIK (c), Bojan, VIZINTIN, Joze. **Load carrying capacity of duplex treated low alloy steel under rolling and sliding contact.** *Tribology 2001: plenary and session key papers from the 2nd World Tribology Congress, Vienna, Austria, September 3rd – 7th*, 2001, p. 89 – 92.
- PODGORNIK (d), Bojan, VIZINTIN, Joze. **Wear resistance of plasma and pulse plasma nitrided gear.** *Gear Technology 2003: www.geartechnology.com*
- PRABHAKARAN, Vijay, TALKE, Frank. E. **Wear and hardness of carbon overcoats on magnetic recording sliders.** *Wear* 243, March 2000, p 18 – 24.
- QI, X. et al. **Two-body abrasive wear of nano- and microcrystalline TiC–Ni-based thermal spray coatings.** In *Surface & Coatings Technology* 200, 2006, p.5037–5047
- QIAN, Limmao, et al., **Anomalous relationship between hardness and wear properties of a superelastic nickel-titanium alloy.** *Applied Physics Letters*, February 16, 2004, Volume 84, Issue 7, p 1076 – 1078.
- RABINOWICZ et al., **Friction and Wear of Materials.** New York: Wiley, 1965
- RIBEIRO, A, et al. **Electrochemical Behavior of Pure Titanium in Alternative linear Regime of Sliding in Contact with Artificial Saliva solutions.** 207th ECS Meeting , Quebec, Canada, May 15th – 20th , 2005
- ROCHA, Alexandre da Silva, et al., **Avaliação do Desgaste de Brocas de Aço Rápido Nitretadas a Plasma.** Texto técnico publicado em Julho – 2001 no site <http://www.infomet.com.br>. (acessado em 29/05/2006)
- RODRIGUES, Adolfo, ICHIMURA, Hiroshi. **Analytical correlation of hardness and scratch adhesion for hard films.** In *Surface and Coatings Technology* 148. 2001. p 8 – 17.
- SCHAAF, Peter. **Laser nitriding of metals.** In *Progress in Materials Science* 47, 2002, 1 – 161.
- SHARMA, Garima, et al., **Sliding wear resistance of iron aluminides.** *Bull. Mater. Sci.*, Volume 26, No. 3, April 2003, p. 311 – 314.
- SONG, R., et al. **Mechanical properties of an ultrafine grained C–Mn steel processed by warm deformation and annealing.** In *Acta Materialia* 53,2005, p. 4881–4892
- SOUSA, F. G. P. et al. **Avaliação de Incerteza de Medição da Dureza ao Risco e da Energia de Remoção Específica de um Esclerômetro Retilíneo.** Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004. 20 f.

STALLARD, J., POULART, S., TEER, D. G. **The study of the adhesion of a TiN coating on steel and titanium alloy substrates using a multi-mode scratch tester.** In Tribology International. 2005. p 1 – 8.

TEKELI, S., GÜRAL, A. **Dry sliding wear behaviour of heat treated iron based powder metallurgy steels with 0.3% Graphite + 2% Ni additions** In Materials and Design, 2006

VENUGOPALAN, R., PARTIN, J. **Modifying a Rotating Disc Electrode Assembly to Conduct Scratch Testing on Implant Alloys.** new.ametek.com/content-manager/files/PAR/mod_rde.pdf , acessado em 29/05/2006.

WU, Fan-Bean, et. al. **Phase transformation and hardness of the Ni–P–Al ternary coatings under thermal annealing.** In Thin Solid Films 494, 2006, p. 151–154.

YOSHIDA, Shuh. **Seleção de Aços e Tratamentos Térmicos para Ferramentas de Conformação a Frio – Estamparia.** Em www.brasimet.com.br/artigos/Estamparia-Modif.pdf, acessado em 14/06/2006.

YUASA, Gustavo T., et al. **Efeito do Campo Magnético no Processo de Nitretação a Plasma de Aço Inoxidável SAE 304.** Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, ITA, 2003.

YUN, Eunsub, LEE, Sunghak. **Correlation of microstructure with hardness and wear resistance in Cr₃C₂/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation.** Materials Science and Engineering A 405, May 2005, p 163 – 172.