

UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA

Estudo Tribológico de revestimentos duros em
TiN e ZrN

por

RUI JORGE NUNES CAPOTE e
ÓSCAR MANUEL DA COSTA FERREIRA



7

621(047.3)/6EM/992/CAPr
01 10 09

PARECER

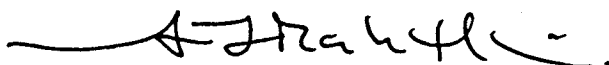
O aluno finalista do Curso de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial RUI JORGE NUNES CAPOTE, realizou no INEGI, no âmbito do programa PRODEP, medida 4.3/7/7/92/93, um estágio cujo trabalho se encontra descrito no relatório apresentado com o título "Estudo Tribológico de Revestimentos Duros em TiN e ZrN"

Durante a execução do conjunto de tarefas que lhe foram atribuídas, o referido estagiário atingiu os objectivos que lhe foram propostos, mostrando ter conhecimentos adequados e empenho.

Face à qualidade do trabalho produzido cumpre-me informar que o estágio realizado se revestiu de grande interesse para a formação do aluno como futuro engenheiro.

Porto, 27 de Dezembro de 1993

O Supervisor





INEGI instituto de
engenharia mecânica
e gestão industrial

Faculdade de Engenharia

Rua dos Bragas • 4099 PORTO CODEX • PORTUGAL
Telef. (02) 311254 • Telex 27323 FEUP P • Fax 319125

Instalações Laboratoriais e Administrativas

R. do Barroco, 174/214 • 4465 S. Mamede de Infesta • PORTUGAL
Telef. (02) 9537348 (4 Linhas) • Fax (02) 9537352

PARECER

O aluno finalista do Curso de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial RUI JORGE NUNES CAPOTE, realizou no INEGI, no âmbito do programa PRODEP, medida 4.3/7/7/92/93, um estágio cujo trabalho se encontra descrito no relatório apresentado com o título **"Estudo Tribológico de Revestimentos Duros em TiN e ZrN"**

Durante a execução do conjunto de tarefas que lhe foram atribuídas, o referido estagiário atingiu os objectivos que lhe foram propostos, mostrando ter conhecimentos adequados.

Face à qualidade do trabalho produzido cumpre-me informar que o estágio realizado se revestiu de grande interesse para esta instituição

Porto, 27 de Dezembro de 1993

O Supervisor

FACULDADE DE ENGENHARIA

**Departamento de Engenharia Mecânica e
Gestão Industrial**

PROGRAMA PRODEP

MEDIDA 4.3

Ação de Formação nº 4

RELATÓRIO FINAL

**"Estudo tribológico de revestimentos duros em
TiN e ZrN**

por

RUI JORGE NUNES CAPOTE

Porto e FEUP, 30 de Setembro de 1993

RESUMO

A realização deste trabalho insere-se nos objectivos curriculares do 5º Ano da Licenciatura em Engenharia Mecânica. Tem por objectivos o estudo e caracterização dos revestimentos duros de TiN e ZrN.

Nesta primeira parte são apresentadas as principais aplicações dos revestimentos produzidos em fase de vapor, os processos disponíveis para a sua produção, bem como as principais limitações de cada um deles. É ainda feita uma breve alusão aos defeitos mais comuns que podem aparecer nestes revestimentos.

ÍNDICE

Parte I

1-INTRODUÇÃO.....	1
2-APLICAÇÕES DOS REVESTIMENTOS.....	2
2.1-Materiais sujeitos a desgaste.....	2
2.2-Ferramentas de corte.....	3
2.2.1-Considerações sobre a utilização de revestimentos em ferramentas de corte.....	3
3-REVESTIMENTOS - MATERIAIS MAIS COMUNS.....	4
4-PROCESSOS DE DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS.....	6
4.1-Técnica de deposição CVD.....	7
4.2-Técnica de deposição PVD.....	8
4.2.1-Evaporação.....	8
4.2.2-Placagem iônica.....	10
4.2.3-Pulverização catódica.....	11
4.3-PVD versus CVD.....	18
5-REVESTIMENTOS DUROS EM TiN.....	19
5.1-Produção por pulverização catódica reactiva.....	19
5.2-Aplicações práticas.....	22
6-REVESTIMENTOS DUROS EM ZrN.....	25
7-DEFEITOS DOS REVESTIMENTOS PRODUZIDOS EM FASE DE VAPOR...	25

Parte I

1-INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento tecnológico verificado nas últimas décadas na Indústria Metalomecânica, trouxe associados problemas no domínio do fabrico dos componentes mecânicos. Os materiais convencionais utilizados deixaram de ser compatíveis com as novas necessidades, tornando-se premente um melhoramento das suas "performances".

As solicitações a que muitas vezes estão sujeitos os componentes, exigem propriedades que normalmente não são possíveis de reunir apenas num material, já que as características pretendidas à superfície são diferentes das existentes no seu interior. Assim sendo, apresenta-se como solução modificar as características superficiais dos materiais convencionais por alteração da sua superfície. Temos então duas alternativas:

- Realização de tratamentos superficiais;
- Revestimento por deposição de um filme fino;

Esta última solução, porque introduz melhorias substanciais nas características superficiais das peças, nomeadamente aumento da qualidade das ferramentas de corte, melhoramento das propriedades tribológicas em componentes sujeitos ao deslizamento e aumento da resistência à corrosão, não obstante o filme tenha apenas alguns microns de espessura, tem nos últimos anos sido enormemente incrementada e desenvolvida. Alguns autores não exitam mesmo em afirmar ser a actualidade a Idade do Ouro dos revestimentos e estes a maior área de desenvolvimento da tecnologia dos materiais.

[1,2,7,10]

2-APLICAÇÕES DOS REVESTIMENTOS

É muito vasto o campo de aplicação dos revestimentos. Genéricamente, podem-se referir as seguintes aplicações:

- Indústria Metalomecânica;
- Indústria Automóvel (chapas resistentes à corrosão);
- Indústria Electrónica;
- Indústria Química;
- Indústria de Cutelaria;
- Indústria Óptica (Ex: Espelhos, lentes, reflectores, elementos de câmaras de TV, etc.);
- Fins decorativos;
- Outros;

No âmbito dos objectivos deste trabalho é a primeira aplicação que vamos desenvolver mais detalhadamente. Pela sua importância destacamos as aplicações que se seguem. [1,2,3,5,6,7]

2.1-Materiais sujeitos a desgaste

A utilização de lubrificantes é uma das formas mais comuns de reduzir o atrito entre superfícies que deslizam entre si. No entanto, para determinadas condições de funcionamento como sejam elevadas temperaturas, vácuo ou meios radioactivos, os lubrificantes perdem grande parte das suas características. Para obviar este problema usam-se revestimentos auto-lubrificantes.

Dos vários revestimentos já testados, aqueles que melhores características tribológicas introduzem são os formados por Politetrafluoretileno-PTFE (Teflon), por Sulfureto de Molibdénio e por Nitretos e Carbonetos de Titânio. [2,6]

2.2-Ferramentas de corte

A necessidade de conformar materiais cada vez mais duros, bem como o aperfeiçoamento tecnológico -automatização- das máquinas ferramentas acarretam grandes problemas na degradação das superfícies das ferramentas de corte.

Os técnicos viram-se confrontados com a necessidade e simultaneamente grande desafio de desenvolver novos métodos para melhorar as características superficiais das ferramentas, no sentido de aumentar a sua resistência à abrasão, à fadiga e à corrosão. A forma encontrada foi efectuar o revestimento fino, o qual para além de solucionar os problemas referidos, desempenha também um papel importante no aumento do tempo de vida das ferramentas (podendo conseguir-se aumentos entre 300 e 800%).

Nos últimos anos tem-se desenvolvido industrialmente o revestimento de **aços rápidos** o que possibilita a conformação de materiais duros utilizando ferramentas complexas. Consegue-se assim associar uma boa resistência ao desgaste com uma elevada tenacidade. Este é apenas um exemplo elucidativo da utilização recente dos revestimentos. Porém, outros materiais como por exemplo **carbonetos duros** já vinham sendo revestidos com sucesso, utilizando para o efeito revestimentos à base de titânio e alumínio (nitretos, carbonetos e óxidos destes).

Presentemente a investigação recai sobre o revestimento de aços rápidos por materiais tais como WC, HfC, NbC, TaN e ZrN os quais aliam as boas propriedades de corte e de isolamento térmico, o que evita o aquecimento do núcleo da ferramenta e a sua consequente degradação. [1,2,5,6]

2.2.1-Considerações sobre a utilização de revestimentos em ferramentas de corte

Os revestimentos não devem ser encarados como solução para todas as ferramentas. Um dos factores primordiais a ter em consideração é o binómio custo/produktividade introduzido pelo uso

do revestimento. Deve analisar-se se o acréscimo de custo devido ao revestimento é compensado pela redução dos tempos mortos da máquina, designadamente as paragens para substituição da ferramenta. Este problema tende a minorar-se num futuro próximo, atendendo a que os esforços da investigação se centram no objectivo de aumentar as propriedades de corte sem aumento do custo das ferramentas. Contudo, outros factores devem ser tidos em consideração quando se recorre aos revestimentos, tais como:

- Material a maquinar;
- Velocidade de corte;
- Tipo de corte (desbaste, acabamento, etc.);
- Máquinas ferramentas disponíveis;
- Dimensão, geometria e tolerâncias da peça a maquinar;
- Quantidade de peças a maquinar;

Pode-se então afirmar que as ferramentas deverão ser revestidas quando se verificam as seguintes situações:

- O material a maquinar possui elevada dureza;
- A máquina-ferramenta tem elevada potência, rigidez e elevadas velocidades de corte;
- As peças têm geometria complexa e tolerâncias apertadas;
- Elevada cadência de produção;

[1,2,5,7,10]

3-REVESTIMENTOS-MATERIAIS MAIS COMUNS

Entre os materiais mais utilizados industrialmente destacam-se os Nitretos de Titânio, a Alumina, o Carboneto de Titânio, os Carbo-Nitretos de Titânio, o Nitreto de Silício e os Nitretos de Háfnio.

Também se utilizam por vezes os Nitretos de Zircónio, os Carbonetos de Tungsténio e os Carbonetos ou Nitretos de Crómio e Háfnio.

Como factores a ter em conta nos materiais dos revestimentos podemos apontar o ponto de fusão ,a dureza a quente e a estabilidade termodinâmica. Estes factores constam da tabela e figuras seguintes:

TABELA I - Pontos de fusão de diversos óxidos, carbonetos e nitretos [11]

Carbonetos	$T_m(^{\circ}F)$	Óxidos	$T_m(^{\circ}F)$	Nitretos	$T_m(^{\circ}F)$
WC	5030	V_2O_3	3578	HfN	5990
Al_4C_3	4900 ± 100	TiO_2	3340 ± 30	TaN	5590
VC	4950 ± 150	(Brookite)		ZrN	5400
NbC	6330 ± 135	$\alpha-Al_2O_3$	3720 ± 40	TiN	5310
TaC	7080 ± 100	MgO	5117 ± 35	NbN	3720
ZrC	6225 ± 40	ZrO_2	5010 ± 150	VN	3720
TiC	5550 ± 30	HfO ₂	5140 ± 90	CrN	2730
HfC	7100 ± 100	NbO	3533	-	-
		-	-	-	-

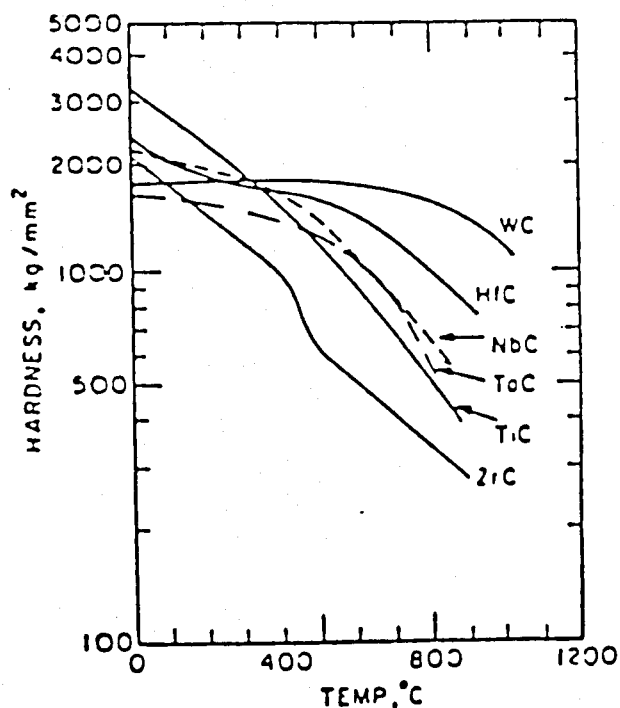


Fig. 1 - Dureza a quente de alguns carbonetos [11]

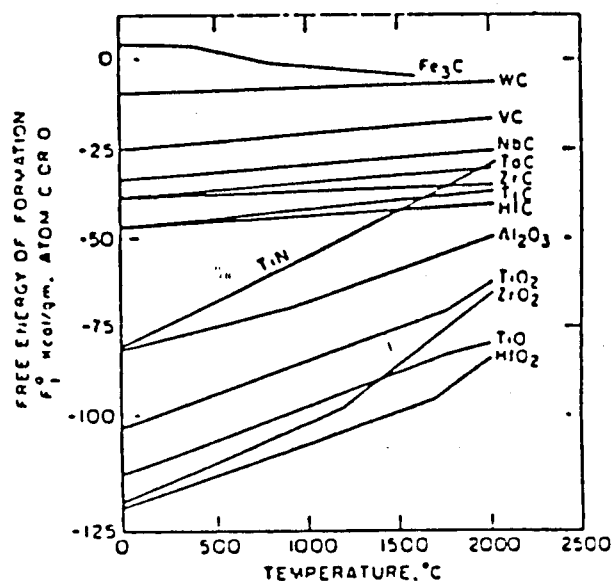


Fig. 2 - Energia livre de formação de alguns compostos relacionados com ferramentas em função da temperatura [11]

É de grande importância que o processo de deposição dos revestimentos seja fiável e reproduzível, o que por si só, condiciona a aplicação de alguns materiais, eventualmente interessantes que constam da tabela e figuras acima. [1,11]

4-PROCESSOS DE DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS

Pode-se dividir estes processos em 2 grandes grupos:

-Deposição química em fase de vapor-**CVD**
(em Inglês - Chemical Vapour Deposition)

-Deposição física em fase de vapor-**PVD**
(em Inglês - Physical Vapour Deposition)

No quadro I encontram-se compilados estes processos e as diferentes técnicas de deposição de revestimentos.

QUADRO I

TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO FÍSICA EM FASE DE VAPOR (PVD)	.Evaporação .Placagem (ou Deposição) iónica .Pulverização catódica - em corrente contínua ou em rádio-frequência: diodo ou magnetron, reactiva ou não reactiva
TÉCNICAS DE DEPOSIÇÃO QUÍMICA EM FASE DE VAPOR (CVD)	.Clássica (CVD) .Assistida por Plasma (PACVD) .Assistida por Laser (LCVD)

Os processos constam basicamente de 3 fases:

- Criação da fase gasosa;
- Transporte dos átomos/moléculas para o substrato;
- Crescimento do filme sobre o substrato;

Quanto ao equipamento necessário para a produção de filmes/revestimentos, consiste essencialmente no seguinte:

- Uma fonte de energia;
- Uma câmara de deposição;
- Um sistema de vácuo;
- Aparelhagem de medida;

As características destes, dependem dos diversos processos de deposição.

Na selecção de um determinado processo deve ter-se em consideração os seguintes factores:

- Fim a que é destinado o revestimento;
- Natureza e propriedades do substrato;
- Tipo de revestimento;
- Forma e dimensão do substrato;
- Produtividade do processo.

[1,2,7]

4.1-Técnica de deposição CVD

A deposição química em fase de vapor pode definir-se como a síntese de um composto no qual os constituintes da fase gasosa reagem quimicamente para o formar, ou seja, baseia-se essencialmente em processos químicos de reacção, tendo como variáveis intervenientes a temperatura, pressão total, pressões parciais dos gases no interior da câmara, fluxo dos gases, etc.

Esta técnica é talvez a mais utilizada no fabrico de filmes finos, tendo boas características de uniformidade e pureza e uma larga gama de estéquiometrias. Estes factores aliados a uma grande versatilidade conferiram-lhe nos anos 60 uma grande popularidade.

Atendendo a que esta técnica não é muito indicada para efectuar revestimentos duros de TiN e ZrN, não nos alongaremos mais na descrição desta. [1,2]

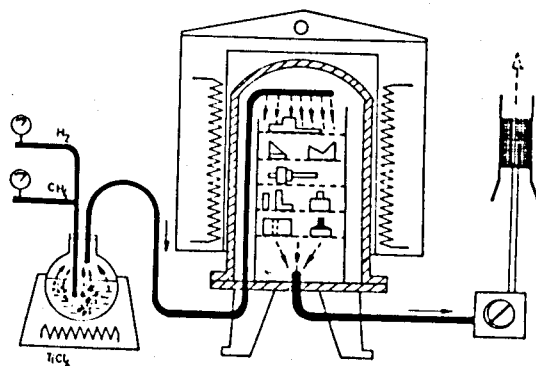


Fig.3-Esquema de câmara de deposição química (CVD). [2]

4.2-Técnica de deposição PVD

A deposição física em fase de vapor é a técnica mais recente utilizada no fabrico de revestimentos na Indústria Metalomecânica. Podemos considerar 2 grandes grupos: os que utilizam energia térmica e os que utilizam energia mecânica.

No primeiro podemos incluir a **evaporação** (ou evaporação no vácuo-Vacuum Evaporation) e a **deposição iónica** (ou **placagem iónica**-Ion Plating).

Quanto ao segundo, temos a **pulverização catódica** (Sputtering).

Em ambos os casos o material é vaporizado e viaja dentro da câmara até ao substrato (peça a revestir) condensando de seguida.

[1,2,3,4,5]

4.2.1-Evaporação

Este é um dos métodos mais simples de deposição de revestimentos sobre substratos. A evaporação do metal a depositar é feita numa atmosfera rarefeita ou no vácuo. A energia térmica necessária é produzida por um canhão (feixe) de electrões, por indução, por arco ou por resistências eléctricas (para pequenas quantidades). Os materiais utilizados para os depósitos encontram-se em condições normais de pressão e temperatura e no estado

sólido. Para que o processo se desencadeie é necessário elevar a pressão e temperatura a valores convenientes, por forma a que o número de átomos que deixa a amostra seja superior ao número de átomos que choca com ela. Isto é, que haja movimento de moléculas gasosas para o substrato. Ao chocarem com este, estas moléculas comunicam-lhe o seu excesso de energia e adquirem uma temperatura à qual a sua pressão de vapor é tão baixa que não lhe permite manter-se no estado gasoso, aderindo ao substrato sob a forma de revestimento. Este processo só pode ser adoptado para revestir os substratos que "vêm" a fonte de emissão. Isto é devido à trajectória das moléculas gasosas no interior da câmara.

A introdução de um gás rarefeito na câmara a uma pressão de 10^{-1} Pa, permite alterar as direcções dos átomos emitidos pelo alvo, o que possibilita o revestimento de superfícies que não "vêm" o alvo (por exemplo: furos, etc.).

A evaporação por feixe de electrões ou por arco eléctrico apresenta algumas vantagens uma vez que o aquecimento, apenas da superfície do material a depositar, evita contaminações entre o material e o recipiente que o contém.

Como nota final, refira-se que os revestimentos obtidos por evaporação têm normalmente uma **adesão relativamente má**, nomeadamente quando se trata de revestimentos de componentes sujeitos a solicitações mecânicas. [1,2,3,4,5,6,7]

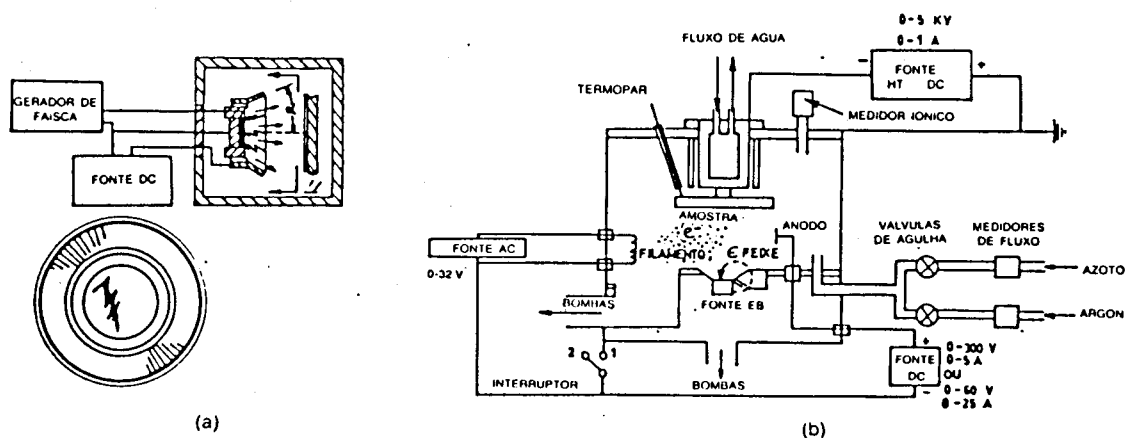


Fig.4-Esquema de câmaras de evaporação para ferramentas de corte (a) arco; (b) feixes de electrões. [2]

4.2.2-Placagem iônica

A Placagem iônica pode ser considerada como uma variante da evaporação, apenas com a diferença de que ao substrato é aplicado um potencial negativo de 2000 a 5000V, criando em torno do mesmo um plasma. Ao atravessar o plasma as partículas evaporadas são parcialmente polarizadas, porém, devido à baixa densidade do plasma a activação dos átomos não é muito eficaz. É pois necessário reduzir a velocidade de evaporação para que o material depositado tenha uma composição estéquiometria, quando composto.

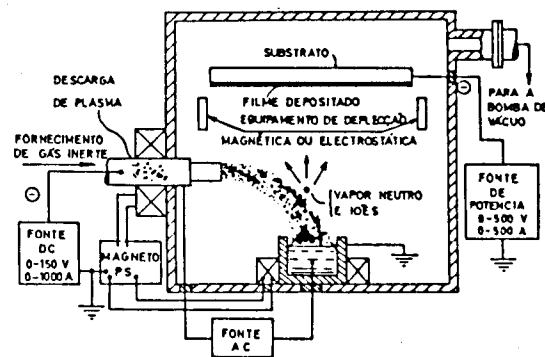


Fig.5-Esquema da câmara de placagem iônica.[2]

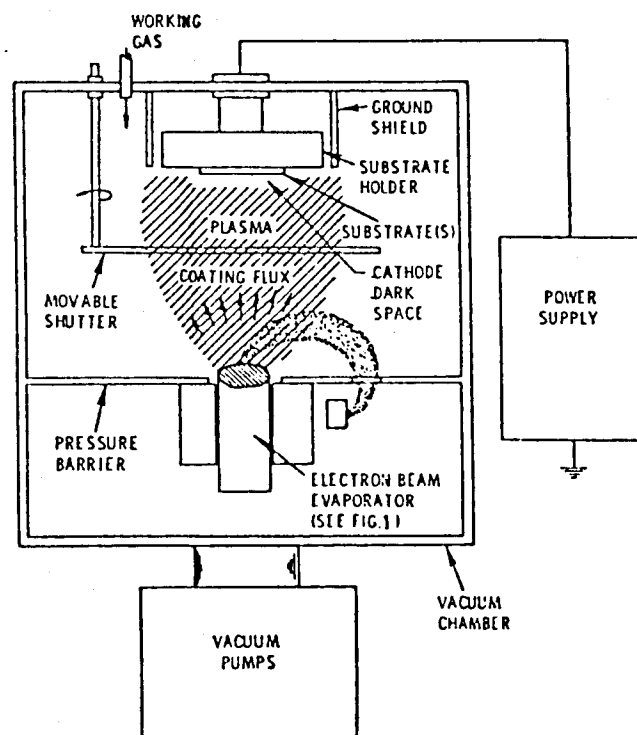


Fig.6-Esquema do processo de placagem iônica.[3]

Na placagem iônica a camada em crescimento é bombardeada por iões do plasma aumentando a mobilidade e a energia dos átomos recentemente adicionados. Estes podem assim corrigir as suas posições na rede cristalina permitindo a condensação no substrato segundo uma composição e uma estrutura ideal, melhorando a densidade do revestimento e diminuindo o número de defeitos cristalográficos. Quanto à estrutura e composição verifica-se que os filmes depositados em fase de vapor apresentam uma orientação de crescimento preferencial o que dá origem a propriedades muito interessantes sob o ponto de vista mecânico, como sejam a resistência ao desgaste e o coeficiente de atrito.

Comparando os revestimentos obtidos por esta técnica com os que se obtêm por evaporação verifica-se que os revestimentos têm uma maior aderência, isto porque a presença do plasma junto do substrato, elimina as impurezas à superfície (por decapagem iônica), assim como pode criar microporosidades no substrato, as quais proporcionam uma boa aderência do filme ao substrato.

É de referir ainda que este processo também não permite revestir formas muito complexas, tal como a evaporação. [1,2,3,4]

4.2.3-Pulverização catódica

O processo de pulverização catódica apresenta-se como uma das técnicas com mais futuro para o revestimento de componentes mecânicos, pois é um dos processos mais vocacionados para a deposição de filmes em substratos de forma complexa, possibilitando a deposição de filmes em diversos materiais e ainda a produção de filmes em multicamadas.

A pulverização catódica é também um dos métodos de maior interesse para o revestimento de substratos em aços tratados termicamente. Isto porque pode ser considerada como um processo "frio" (a temperatura máxima no substrato durante a deposição é aproximadamente 400°C), o que proporciona grandes vantagens pois evita tratamentos térmicos posteriores com as consequências nefastas que estes acarretam. Como exemplos destas salientam-se a contaminação do revestimento, variações dimensionais significativas e fissuração no revestimento, devidas a diferentes coeficientes de

dilatação térmica entre os filmes e o substrato, como é o caso dos revestimentos cerâmicos sobre substratos de aços tratados. Saliente-se que este processo ao permitir a deposição a baixa temperatura, possibilita a utilização de substratos poliméricos ou outras substâncias de baixo ponto de fusão. [1,2,3]

O desenvolvimento da pulverização catódica teve início no século passado quando Grover e Plucker verificaram que quando se estabelecia uma descarga eléctrica entre dois eletrodos colocados sob vácuo no interior de uma câmara se depositava lentamente, quer no ânodo quer nas próprias paredes da câmara uma camada fina de material.

Já no decorrer da década de 30, do corrente século, apareceram as primeiras aplicações industriais do processo ainda que apenas para efeitos decorativos, sendo posteriormente aplicados à indústria óptica e electrónica. A grande divulgação do processo tem lugar já nos anos 70, para o revestimento de materiais sujeitos a esforços mecânicos, sendo utilizados para o efeito um cátodo sujeito a um campo magnético (magnetron), processo que permite velocidades de deposição elevadas e proporciona uma boa aderência do filme ao substrato. [1,2,3]

No processo de pulverização catódica, o material é pulverizado ou atomizado pelo bombardeamento de iões de Argon, que incidem sobre o material de um alvo. Este alvo está colocado em frente ao porta-substratos e expelle átomos com elevada energia. Esta energia faz com que os átomos expelidos do alvo atravessem a câmara, indo depositar-se sobre a peça a revestir. Os átomos ao entranharem-se na superfície da peça a revestir promovem uma forte adesão do material ao revestimento. A interface pode então considerar-se puramente mecânica, não obrigando por isso, à existência de ligação química. Como desvantagens deste processo pode referir-se a baixa taxa de deposição, em relação aos processos que se baseiam na evaporação. As figuras que se seguem ilustram o processo de pulverização catódica. [1,2,3]

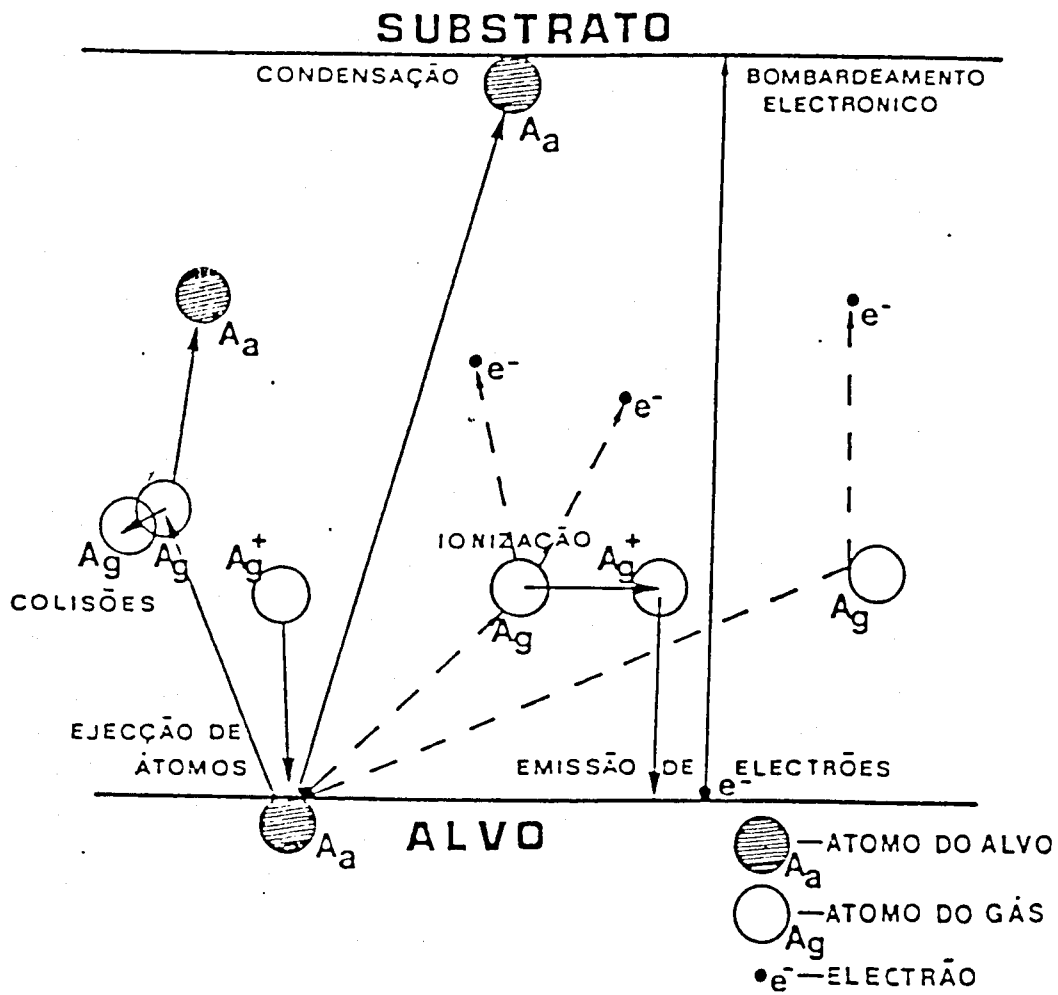


Fig. 7 - Esquema do processo de deposição.[7]

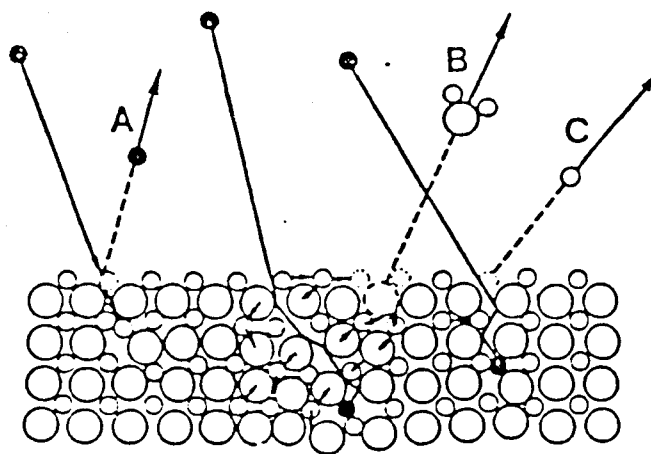


Fig.8 - Emissão de partículas por bombardeamento iónico.[7]

- — ião
- o — átomos do substrato
- A — ião retrodifundido
- B — ejeccção indirecta
- C — ejeccção directa

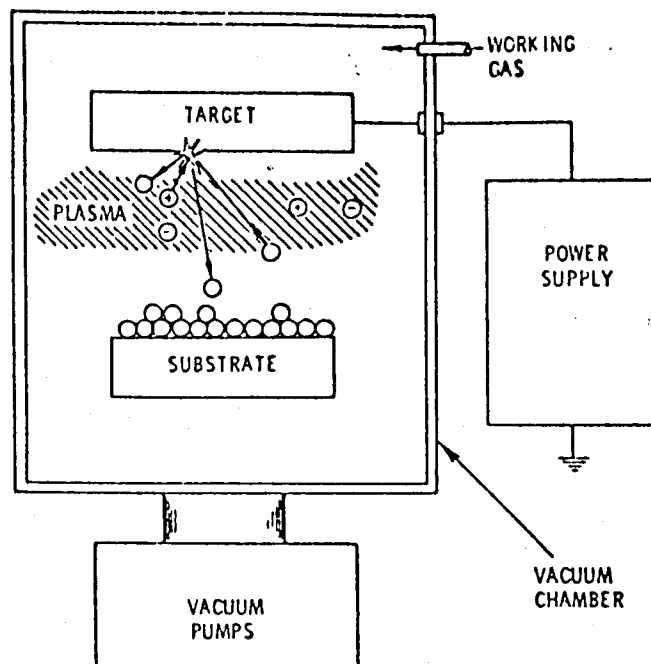


Fig 9 - Esquema básico da pulverização catódica.[3]

A pulverização catódica pode dividir-se em três fases fundamentais:

- Criação e manutenção do plasma;
- Ejeção ;
- Deposição.

i) Criação e manutenção do plasma.

Ao aplicar-se uma diferença de potencial (por corrente contínua ou rádio-frequência) entre dois electrodos colocados numa câmara sujeita a vácuo (10^{-3} Pa) onde foi introduzido um gás inerte (Argon) dá-se origem à criação do plasma. A manutenção deste plasma é feita pela acção de electrões secundários emitidos pelo choque de iões Argon contra os electrodos.

ii) Ejeção.

O arranque de átomos ou grupo de átomos do alvo, assim como a emissão de electrões secundários necessários à manutenção do plasma é consequência do bombardeamento do alvo por iões de Argon, devido a este se encontrar submetido a um potencial negativo (c.c ou r.f.). Os referidos átomos podem ser de uma substância simples ou composta dependendo da constituição do alvo, obtendo-se assim um revestimento de composição semelhante à do alvo, designando-se este processo por **Pulverização Catódica não Reactiva**. Partindo-se de uma substância simples e introduzindo um gás complementar (N , CH_4 , O_2 , etc.) obtêm-se nitretos, carbonetos ou óxidos da substância que constitui o alvo, sendo designado este processo por **Pulverização Catódica Reactiva**. Este processo apresenta, no entanto, algumas limitações, em particular se o gás contém substâncias que contaminam o alvo. Exemplos significativos são os hidrocarbonetos, os quais podem contaminar o alvo com carbono impedindo a pulverização catódica devido à baixa velocidade de ejeção deste elemento, que é quase nula.

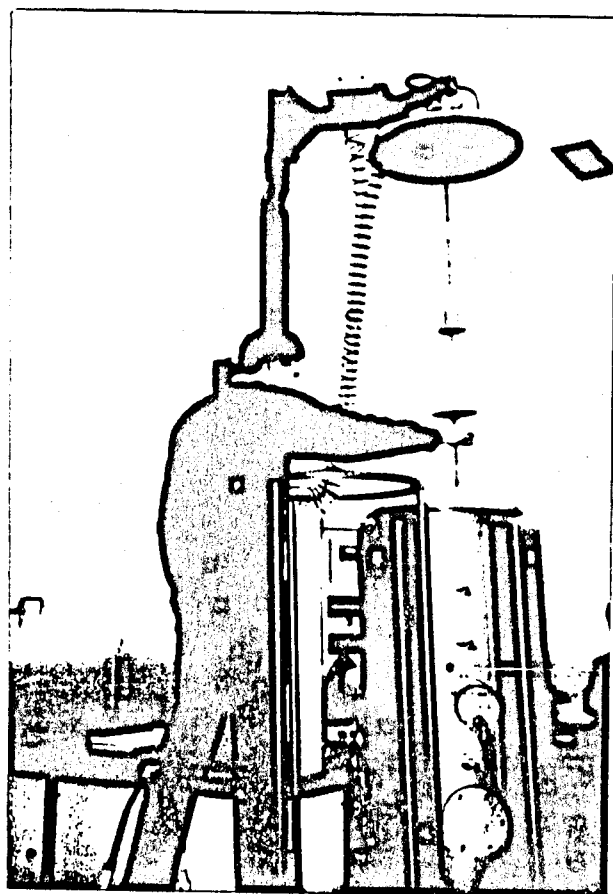
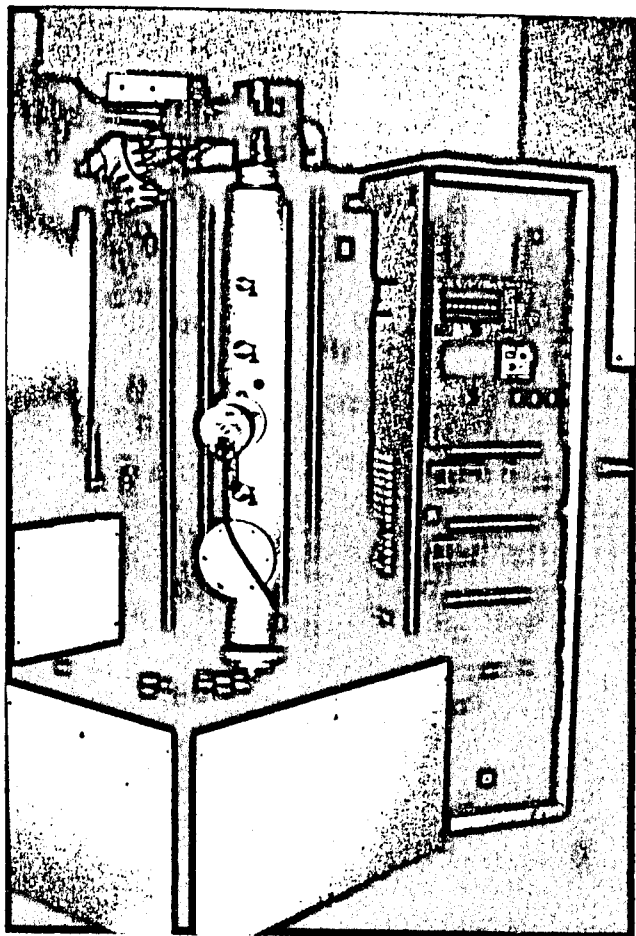
iii) Deposição.

A fim de promover a formação de filmes aderentes os átomos ejectados do alvo têm que possuir uma energia elevada que lhes possibilite percorrer a distância entre o alvo e o substrato e sua adesão a este, formando os depósitos aderentes.

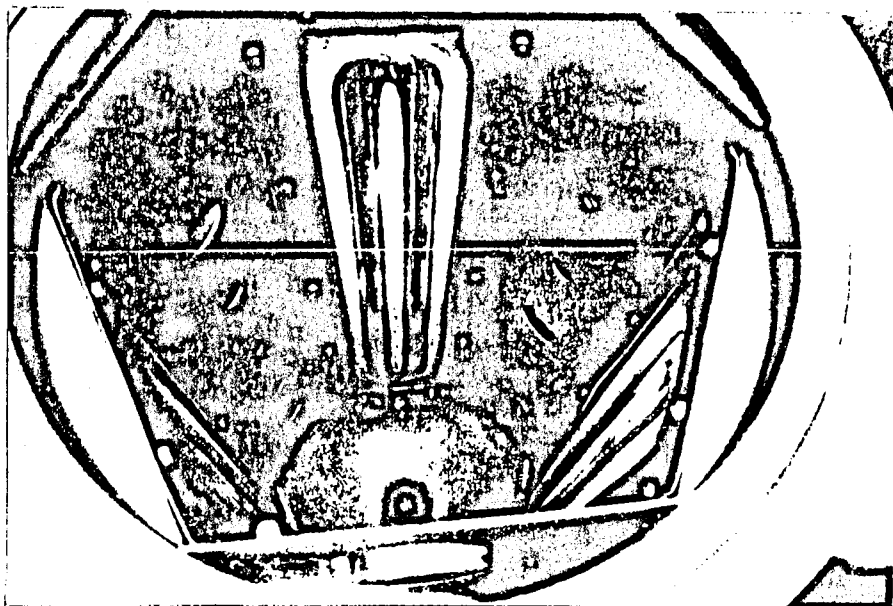
A velocidade de deposição depende directamente do tipo de partículas existentes na atmosfera da câmara e indirectamente de outros parâmetros tais como:

- Pressão;
- Distância entre electrodos;
- Presença de um campo magnético no cátodo.

A existência de um campo magnético permite confinar o plasma em torno do alvo melhorando significativamente a sua actividade e em consequência a rentabilidade do processo de deposição.



Fotografias 1 e 2-Máquina de pulverização catódica.
(Instalada na REGULADORA-PVD, V.N. de Famalicão). [15]



Fotografia 3-Interior da câmara de deposição da máquina de PVD
apresentada nas Fotografias 1 e 2. [15]

4.3-PVD versus CVD

O quadro seguinte mostra-nos as vantagens e desvantagens dos processos PVD e CVD.

PVD

VANTAGENS

- Boa adesão;
- Temperatura de deposição relativamente baixa o que permite tratamentos térmicos prévios;
- Permite a deposição de ligas complexas, com bom controle da sua composição;
- Os componentes podem ser limpos por pulverização;
- Permite grandes taxas de deposição;

DESVANTAGENS

- Requerem componentes complexos;
- Problemas com os componentes múltiplos;
- Não é particularmente indicado para produção em série;
- Capacidade limitada pelos componentes;
- Na evaporação, quando o material a depositar é somente de uma substância, pode dissociar-se;
- Investimento inicial avultado;

CVD

VANTAGENS

- Revestimento conveniente para formas complexas e com orifícios;
- Fácil de carregar e manejar;
- Potencial para revestimentos de diferentes composições;
- Ideal para filmes finos;

DESVANTAGENS

- A alta temperatura limita os substratos a revestir;
- Cada tipo de revestimento requer um processo químico diferente;
- Algumas restrições para peças volumosas;
- Processo relativamente lento;
- Investimento avultado;

QUADRO II-PVD e CVD: Vantagens e desvantagens. [4]

5-REVESTIMENTOS DUROS EM TiN.

5.1-Produção por pulverização catódica reactiva.

A forma mais comum de revestimentos de nitretos de titânio é a pulverização catódica reactiva. Na Fig.11 é apresentado um esquema deste processo.

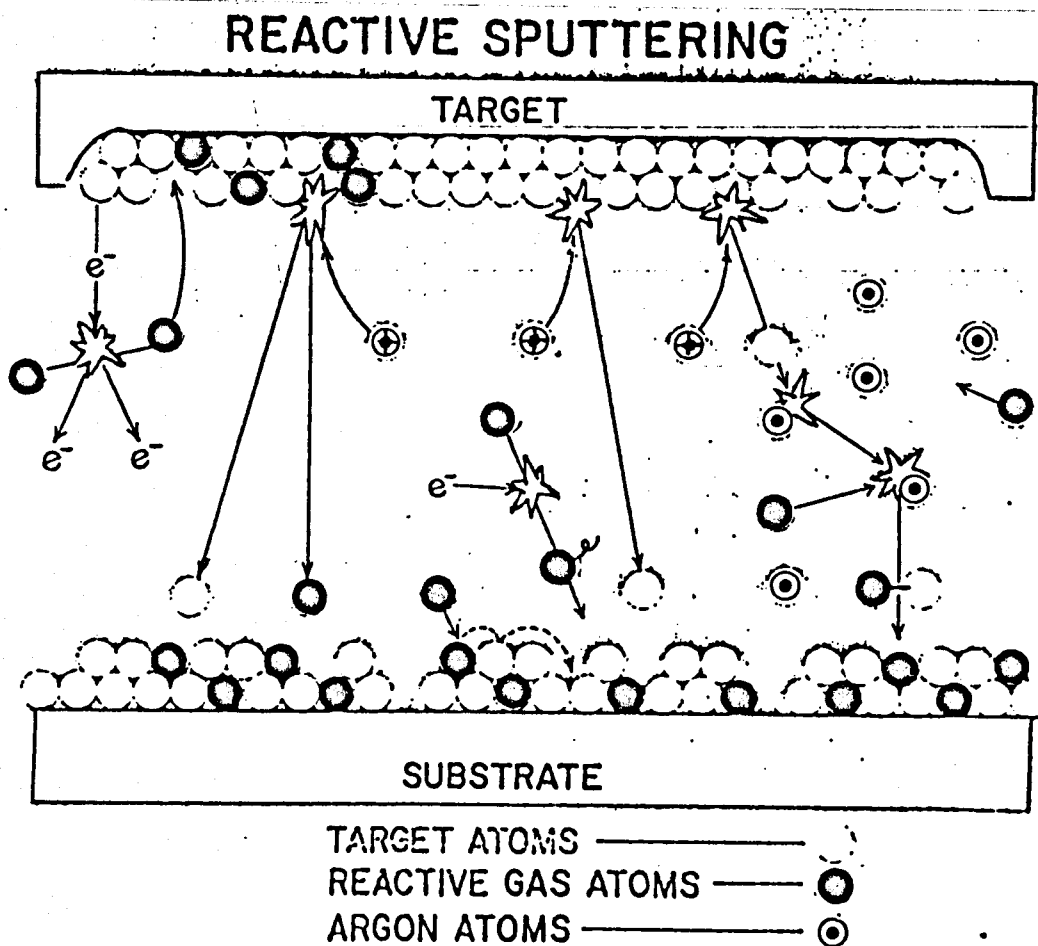


Fig.11 - Esquema da pulverização catódica reactiva.[5]

Através deste processo podem obter-se nitretos de titânio com diferentes estruturas e consequentemente diferentes propriedades, as quais são influenciadas pelo teor de Azoto, que normalmente varia entre 0.7 e 1.1 . O Titânio forma com o Azoto TiN cúbico (tipo NaCl) e TiN (tetragonal simples ou de corpo centrado). As propriedades TiN além de variarem com o teor de azoto, variam também com a direcção em que se dá o crescimento do filme, com os teores de impurezas (oxigénio e carbono) e com a presença de átomos de argon oriundos do plasma. A fim de obter as melhores propriedades de um depósito de TiN, torna-se necessário garantir a estequiometria, o tipo de tensões residuais, o tipo e a quantidade de fases em presença e ainda o grau de impurezas.

A deposição dos revestimentos de TiN é feita vaporizando por pulverização catódica, fazendo-se reagir estes átomos com o azoto previamente introduzido na câmara de deposição.

São as seguintes as variáveis de controle de uma máquina de pulverização catódica:

- Potência;
- Velocidade de bombagem da estação de vácuo;
- Pressão da câmara;
- Velocidade do gás de reacção;
- Caudal do gás de reacção;
- Pressão parcial do gás de reacção;
- Grau de pulverização dos substratos;
- Temperatura dos substratos.

Na deposição de nitretos de titânio por pulverização catódica reactiva há uma dependência entre o tipo de estrutura obtido e a pressão parcial de azoto existente na câmara. Assim, podem-se apontar os seguintes casos:

- Pressões parciais de azoto pequenas;
- Pressões parciais de azoto elevadas;
- Pressões parciais de azoto intermédias.

Quando as referidas pressões parciais são pequenas o depósito faz-se segundo o **modo metálico**. Neste caso, os átomos de titânio reagem com o azoto depois de terem sido ejetados do alvo, fazendo-o quer durante o transporte em direcção ao alvo, quer após terem condensado neste. Nestas condições o tipo de estrutura obtido é de $\alpha\text{-Ti+TiN}$.

Se a pressão parcial de azoto é mais elevada, a deposição passa a efectuar-se segundo o **modo reactivo**. Neste caso o azoto reage com o titânio no próprio alvo, "envenenando-o", sendo a taxa de deposição mais reduzida, devido ao grau de ejeção do titânio puro ser muito maior do que a de qualquer composto de titânio com azoto. A estrutura final obtida é de TiN, apresentando teores de N superiores às estruturas estequiométricas.

No caso de a pressão parcial de azoto ser média, estamos perante uma situação de transição entre as duas anteriormente descritas, verificando-se a deposição de Ti_3N_2 e TiN em conjunto.

Dado que para os diferentes casos acima descritos temos propriedades diferentes, torna-se necessário saber qual é a estrutura pretendida para a função em causa. Conforme se viu, a manipulação de um único parâmetro (a pressão parcial de azoto) afecta significativamente as propriedades do depósito. É pois necessário ter um processo afinado para se poder depositar a estrutura pretendida.

Na Fig.11 apresenta-se a relação entre a estrutura obtida, o modo de deposição, a pressão parcial de azoto e a cor obtida. De referir que a cor obtida é muito facilmente afectada pela presença de impurezas ou de tensões residuais. O tipo de estrutura e a orientação cristalográfica de crescimento do filme, afectam por sua vez, o coeficiente de atrito e a resistência ao desgaste. [1]

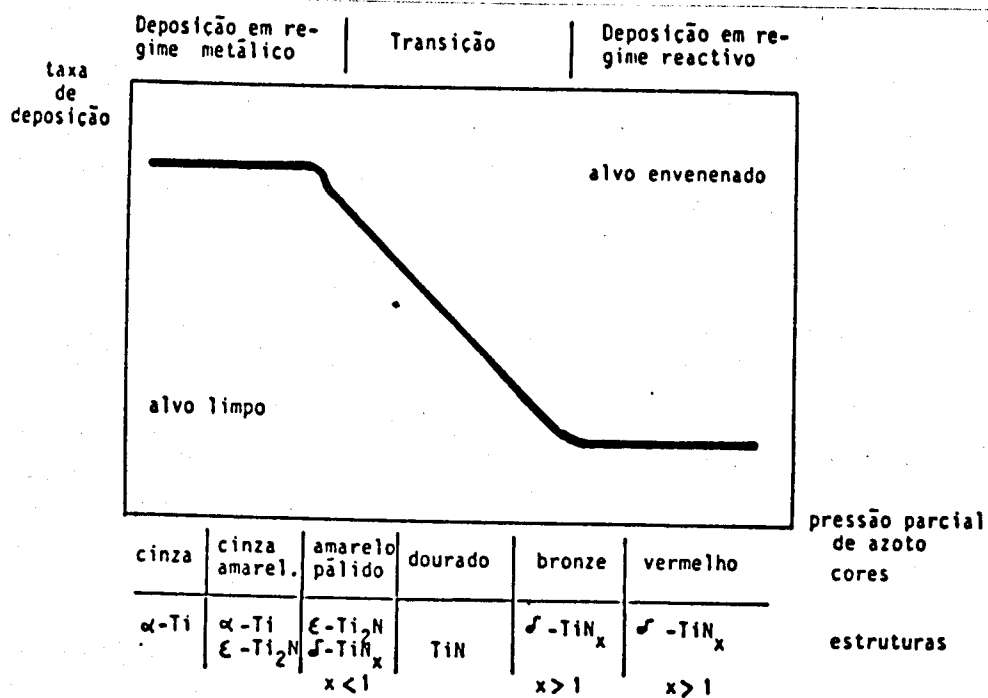


Fig.12-Deposição de nitretos de titânio, estruturas e modos de deposição. [1]

5.2-Aplicações práticas

Os nitretos de titânio encontram aplicações práticas em diversos campos (ver Tabela II). Saliente-se que no caso das ferramentas de corte revestidas, estas apresentam enormes benefícios relativamente às não revestidas. Se bem que o uso de revestimentos duros de TiN se encontre já numa fase avançada, muito há a desenvolver neste campo, não sendo pois de admirar que uma grande fatia da investigação lhes seja presentemente dedicada, não obstante, sejam sem dúvida o material mais estudado de todos aqueles que são usados como revestimentos resistentes ao desgaste.

A aplicação industrial dos nitretos de titânio apresenta alguns problemas para além dos ligados à selecção do tipo de estrutura e afinação do processo. Entre estes realçam-se:

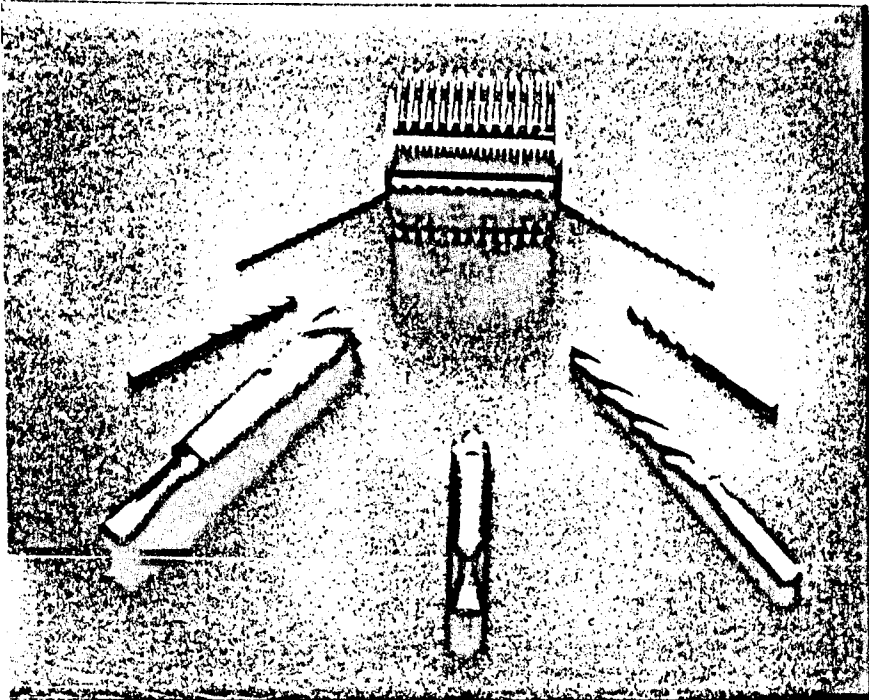
- Problemas de limpeza das peças antes da deposição (é vulgar ejectar-se o material das próprias peças para proceder à sua limpeza superficial actuando elas como alvos pelo período de alguns minutos).

- Problemas de fixação em suportes que deixam marcas ou zonas não revestidas nas peças.
- Problemas de cadência de produção.
- Problemas de limpeza da câmara de deposição (para evitar contaminação).
- Problemas com a forma e geometria das peças, que conduzem a revestimentos não totais das mesmas.

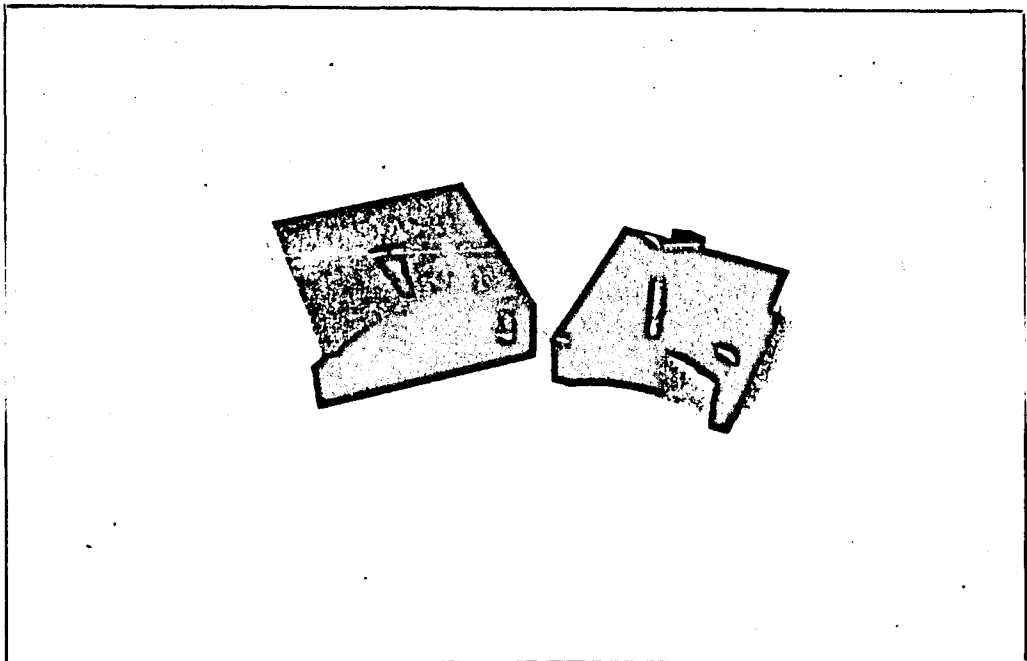
[1]

TABELA II - Aplicações de nitretos de titânio [1]

Aplicação	Utilização	Substrato	Benefícios
Ferramentas	Cunhos e cortantes	Aço ferramentas	Qualidade superficial das peças e aumento da vida das ferramentas (3 a 30x)
Ferramentas	Fresas	Aço rápido	Vida das ferramentas Aumento das cadências de produção
Ferramentas	Pastilhas para fresas	Carbonetos sinterizados	Resistência ao desgaste e resistência ao choque
Ferramentas	Brocas	Aço rápido	Maquinagem de materiais difíceis. Aumento da vida entre 3 e 7 vezes
Orgãos de máquinas	Bombas de óleo de palhetas	Aço de construção de liga	Aumento da vida e redução da potência de accionamento
Orgãos de máquinas	Cubos de rodas de todos os Formula 1	Titânio	Diminuição do desgaste aumento da fiabilidade
Orgãos de máquinas	Rolos de rolamentos	Aço	Resistência à corrosão e ao desgaste
Aeroespacial	Dobradiças e rolamentos sem lubrificação	-	Dispensa o lubrificante
Decorativos	Faqueiros	Aço Inox	Cor dourada e brilho constante (ausência de riscos)
Decorativos	Aros de relógios de pulso	Latão ou aço inox	Cor e resistência ao riscar



Fotografia 4-Exemplos de aplicação dos revestimentos duros de TiN em diversas ferramentas. [15]



Fotografia 5-Ferramenta de corte revestida com TiN. [15]

6-REVESTIMENTOS DUROS EM ZrN

Os revestimentos duros de nitreto de zircónio são obtidos pelos mesmos processos que os revestimentos de nitreto de titânio, sendo o mais usual o processo de pulverização catódica reactiva. As características e propriedades dos revestimentos de ZrN são similares às dos revestimentos de TiN, encontrando-se porém o seu estudo e desenvolvimento numa fase embrionária, pelo que a sua aplicação é presentemente muito reduzida.

As boas características destes revestimentos, nomeadamente em termos tribológicos (resistência ao desgaste, coeficiente de atrito, etc.), auguram para estes um mais vasto campo de aplicação num futuro próximo, quer em aplicações similares ao dos revestimentos de TiN, quer naquelas em que as suas propriedades específicas conferem melhores resultados, tendo em atenção a função que vão desempenhar.

Devido à quase não existência de elementos bibliográficos sobre revestimentos duros de ZrN, não nos é possível efectuar um estudo teórico mais profundo e objectivo destes materiais, pelo que não nos alongaremos mais neste capítulo.

7-DEFEITOS DOS REVESTIMENTOS PRODUZIDOS EM FASE DE VAPOR

Nos revestimentos produzidos em fase de vapor podem-se encontrar alguns defeitos mais comuns, tais como **inclusões** e **porosidades** ou **vazios**, embora outros tipos de defeitos possam aparecer.

As inclusões são normalmente ejectadas do alvo (quando se utiliza um processo de revestimento em que existe um alvo), podendo ser constituídas por partículas do próprio material deste, ou ser resultantes de impurezas e contaminações existentes na câmara de deposição. Estas inclusões, em forma de pequenas gotas, "aterram" no substrato, sendo incorporadas no revestimento. Caso este seja uma liga (ex:TiN ou ZrN), a composição das inclusões (mesmo que tenham sido ejectadas do alvo) é diferente da do revestimento, o que pode dar origem a um foco de corrosão. A ligação entre as

inclusões e o material envolvente é normalmente pobre, por isso, o ataque corrosivo pode afectar o substrato danificando o revestimento.

Se as inclusões se destacam do filme de revestimento originam vazios ou porosidades, o que pode gerar concentrações de tensão localizadas, potenciais causadoras de fissuras de fadiga. Diminuem também a ductilidade e a elongação da peça revestida.

Do que foi dito ressalta a ideia de que se deve ter o maior cuidado na limpeza das peças e da câmara de deposição antes de se começar a depositar o revestimento, pois assim contribui-se significativamente para a diminuição do risco de aparecimento de defeitos. [1,3]

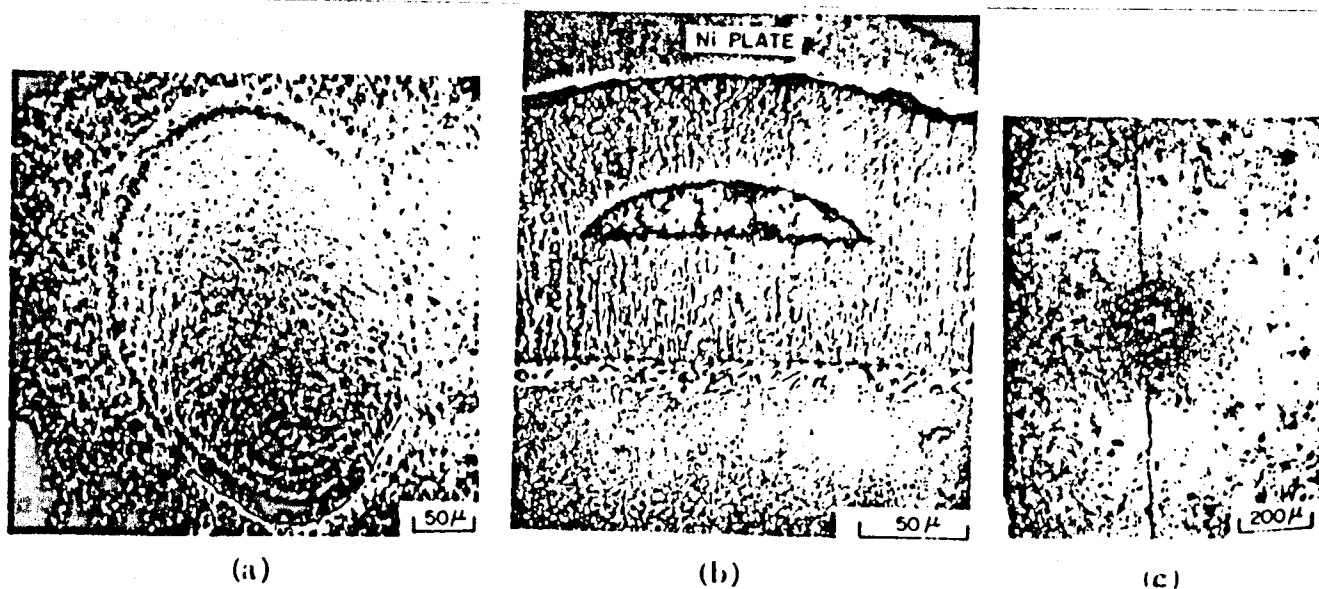


Fig.13-Alguns defeitos dos revestimentos produzidos em fase de vapor. [3]

- a) e b) Inclusões recobertas pelo revestimento.
- c) Fissura de fadiga iniciada num defeito.

BIBLIOGRAFIA

- [1]-A. Tomé Ribeiro
 - Revestimentos Produzidos em Fase Vapor.
 - Deposição por Projectação Catódica Reactiva de Nitretos de Titânio.
 - Boletim de Ciência e Tecnologia; Nº26; Dezembro 1986

- [2]-M^a Teresa Freire Vieira
 - Aplicações dos Revestimentos na Indústria Metalomecânica.
 - Ciência e Tecnologia dos Materiais; Jan./Mar.1989;
 - Sociedade Portuguesa de Materiais; Porto

- [3]-Rointan F. Bunshah
 - Deposition Technologies for Films and Coatings
 - Noyes Publications; 1983; New Jersey

- [4]-Advanced Surface Coating,
 - Physical Vapour Deposition, Cap.IV
 - September 1989

- [5]-Rointan F. Bunshah
 - Materials Coatings Techniques, High Rate Physical Vapor Deposition Processes, Applications of Physical Vapor Deposition Processes
 - AGARD Lecture Series No.106; March 1980

- [6]-David V. Rigney
 - Vacuum Coating
 - Metals Handbook; 9^a Edição; Volume 5; Surface Cleaning, Finishing and Coating; ASM; Março 1987

- [7]-Albano A. C. Rodrigues de Carvalho
 - Utilização da Técnica de Pulverização Catódica de Rádio-Frequência para a Produção de Revestimentos de PTFE.
 - Aplicação à Protecção de Superfícies Espectralmente Selectivas.
 - Tese de Mestrado; FEUP; Março 1986; Porto

- [8]-Elisabeth Weidmann
-Metallographic Preparation of Coated Materials
- [9]-B. Jönsson, S. Hogmark
-Hardness Measurements of Thin Films;
Metallurgical and Protective Coatings
- [10]-Surface Treating and Coating
-Metal Progress; 61; Jan 1985
- [11]-N. P. Suh
-New Theories of Wear and Their Implications for Tool
Materials
-Wear; 62; 1; 1980
- [12]-Jean-Jacques Bessot
-Techniques d'Ingénieur
- [13]-G. Lemperiere
-Couches Minces de Nitrure de Titane obtenue par
Pulverization Cathodique
-Boletim de Ciência e Tecnologia; N°26; Dezembro 1986
- [14]-Robert F. Hochman, D. M. Mattox
-Ion Plating
-Metals Handbook; 9ª Edição; Volume 5; Surface Cleaning,
Finishing and Coating; ASM; Março 1987
- [15]-Célia Novo
-Revestimentos PVD. Novo Departamento da REGULADORA
-Robótica e Automatização; Revista de Informação Técnica
e Científica; N°8; Junho 1992

Agradecimentos

Os autores agradecem:

- Ao Prof. Dr. Monteiro Baptista, pela sua colaboração e grande disponibilidade, sem as quais não nos teria sido possível pôr em funcionamento o equipamento utilizado.

- Ao Prof. Dr. Tomé Ribeiro pela colaboração, disponibilidade e assíduo acompanhamento que se revelaram imprescindíveis na realização da parte prática do presente trabalho.

Parte II

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. TÉCNICAS OPERATÓRIAS	1
2.1. Tribómetro alternativo	1
2.2. Provetes	4
2.3. Ensaaios de desgaste	7
2.3.1. Descrição dos ensaios	7
3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS	8
3.1. Considerações sobre os resultados experimentais obtidos	11
4. CONCLUSÕES	13
ANEXO	15

1-INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por objectivo efectuar a caracterização tribológica dos revestimentos duros de Nitreto de Titânio e Nitreto de Zircónio. Para tal, foram realizados diversos ensaios de desgaste no tribómetro alternativo existente no Laboratório de Tribologia da F.E.U.P., tendo para o efeito sido utilizados provetes de aço CK45, revestidos com TiN e ZrN.

2-TÉCNICAS OPERATÓRIAS

2.1-Tribómetro alternativo

A realização dos ensaios de desgaste no tribómetro alternativo revelou-se uma operação bastante complexa. Tal deveu-se ao facto de ter sido necessário colocar em condições de operacionalidade o tribómetro utilizado, que se encontrava inativo há já algum tempo. Neste sentido foi necessária a realização de várias tarefas entre as quais podemos apontar:

-Aquisição em casas da especialidade de vários componentes electrónicos, tais como díodos, transistores, fichas, cabos, etc.

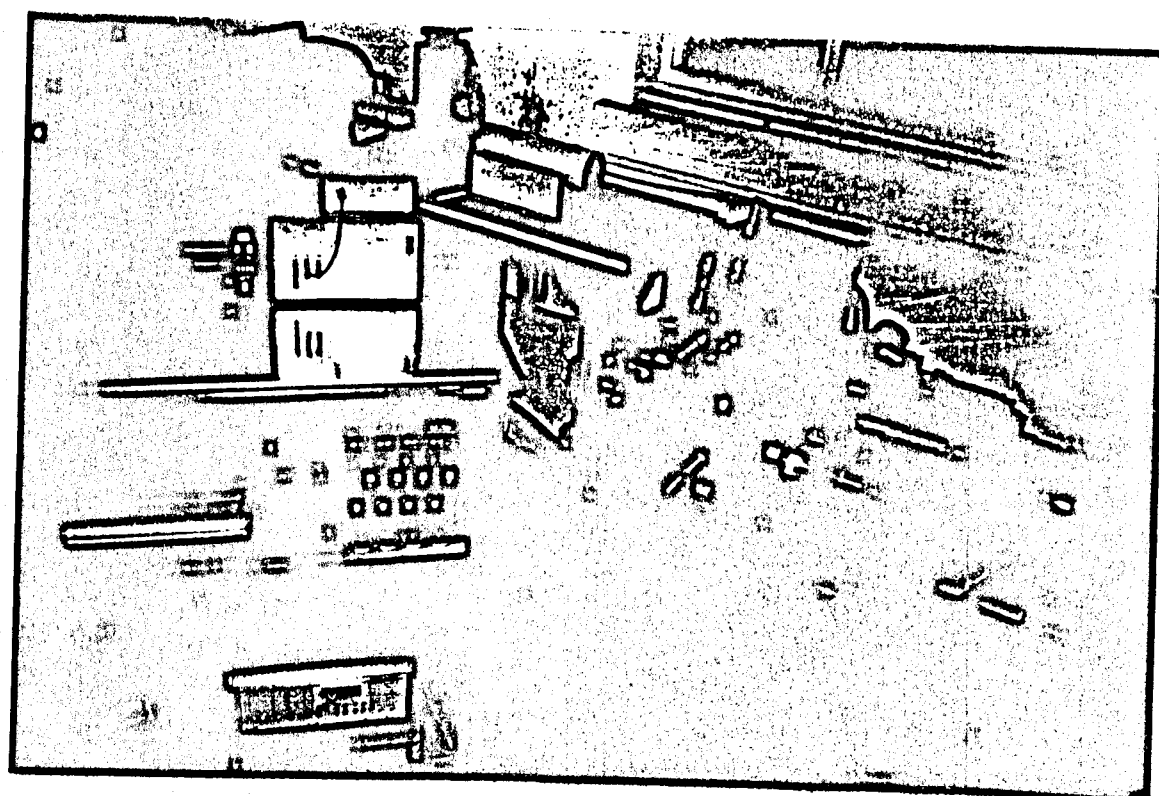
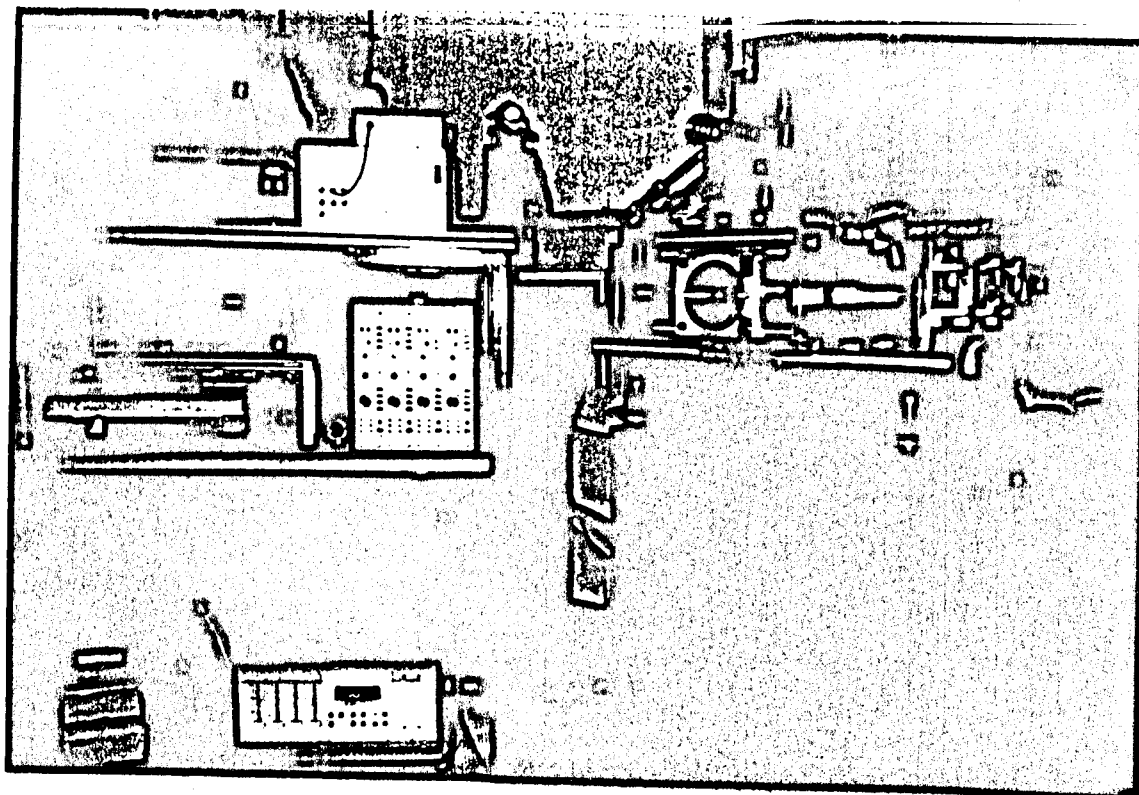
- Concepção e montagem de cabos de ligação entre o tribómetro e os restantes aparelhos.

-Deslocações e contactos com firma especializada, onde foi feita a reparação de um dos aparelhos (ponte rectificadora).

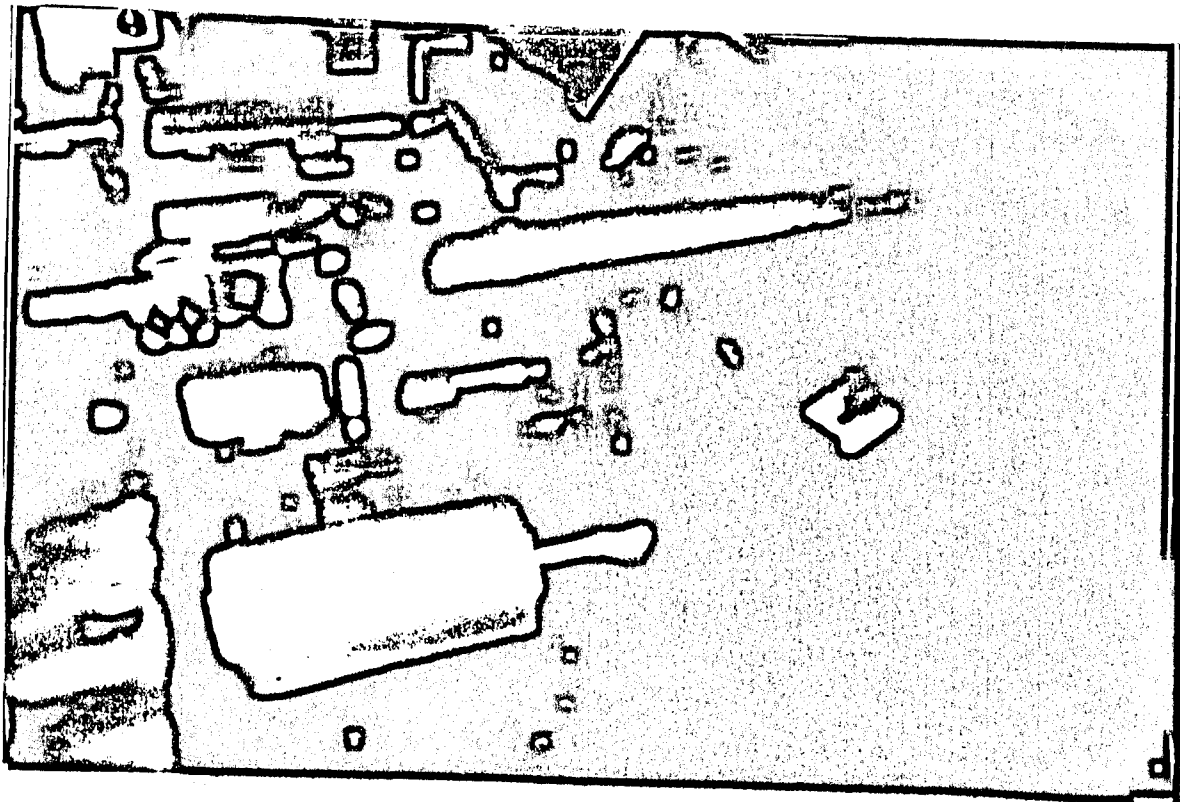
-Diversas intervenções no tribómetro afim de pôr em funcionamento o sistema de lubrificação.

Estas operações revelaram-se necessárias não só porque, como já foi referido todo o sistema se encontrava inactivo há algum tempo, mas também pela necessidade de adaptar o tribómetro à nova ponte de extensometria.

São apresentadas a seguir algumas fotografias do equipamento utilizado.



Fotografias 1 e 2 - Equipamento utilizado para a realização dos ensaios de desgaste. À direita tribómetro alternativo, à esquerda pode ver-se a ponte de extensometria, a ponte rectificadora e respectiva fonte de alimentação, o conta-rotações (e ciclos) e o registador gráfico.



Fotografia 3 - Pormenor do provete montado no porta-provetes do tribómetro alternativo.

2.2-Provetes

Os provetes ensaiados têm as seguintes características:

-Substrato em aço CK45.

.Dureza 205 HV

.Composição química (%) 0.45C, 0.25 Si, 0.65 Mn

.Recozido macio

-Revestimentos em Nitreto de Titânio e Nitreto de Zircónio.

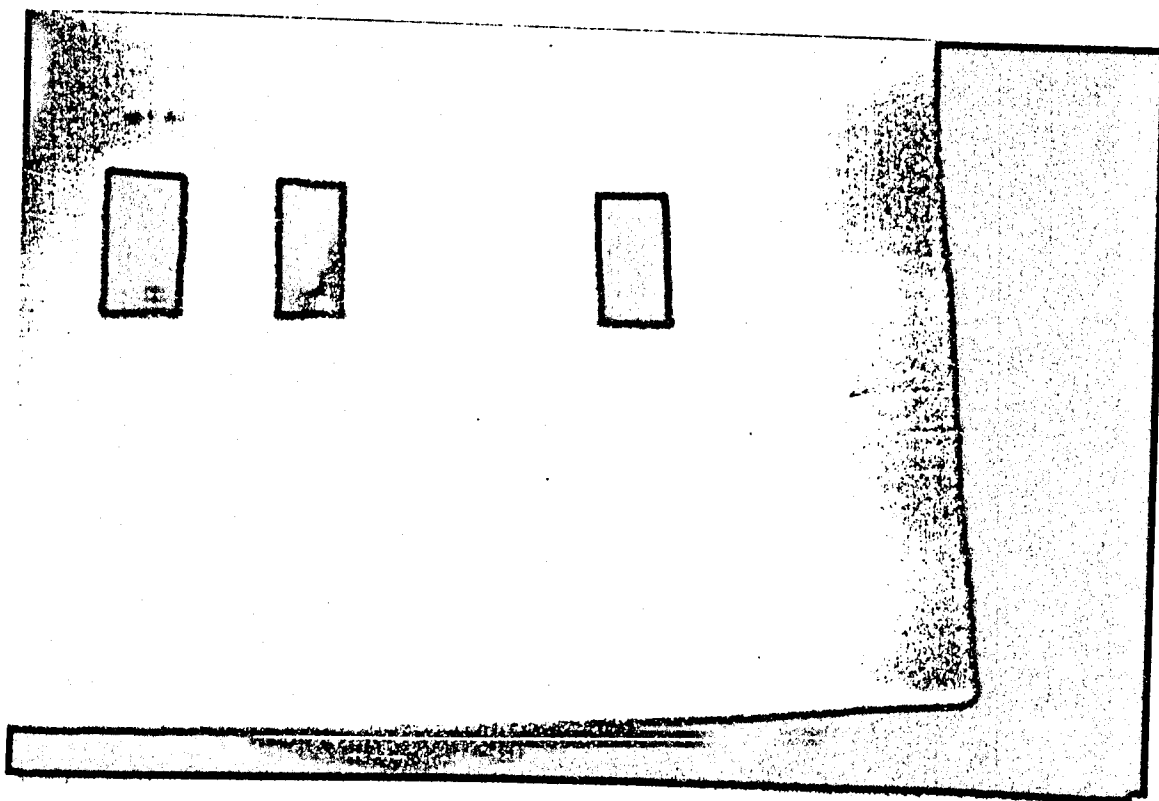
-Dimensões: Adaptadas ao porta-provete do tribómetro.

-Espessura do revestimento - 4 μ m.

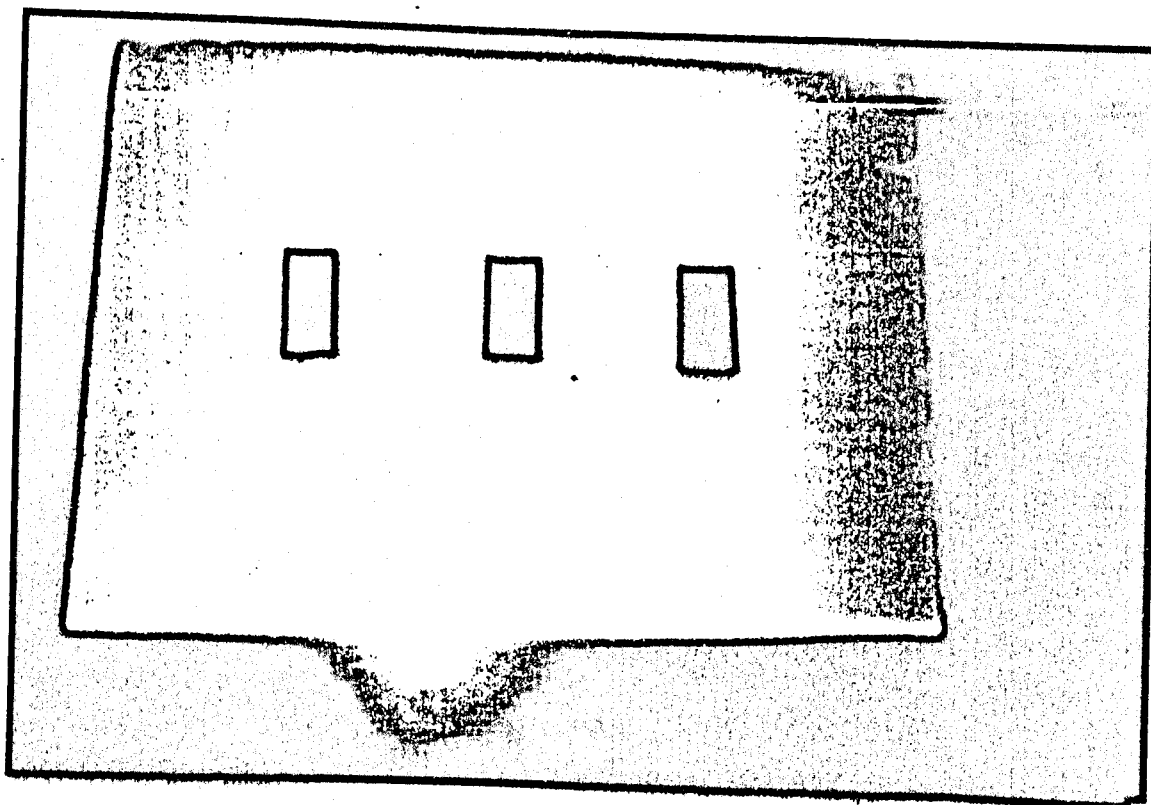
Os provetes estão referenciados da seguinte maneira:

- Provetes revestidos com TiN: N1Ti, N2Ti, N3Ti e TiN (808)
- Provetes revestidos com ZrN: N1Zr e N2Zr
- Provete sem revestimento: Não tem referência

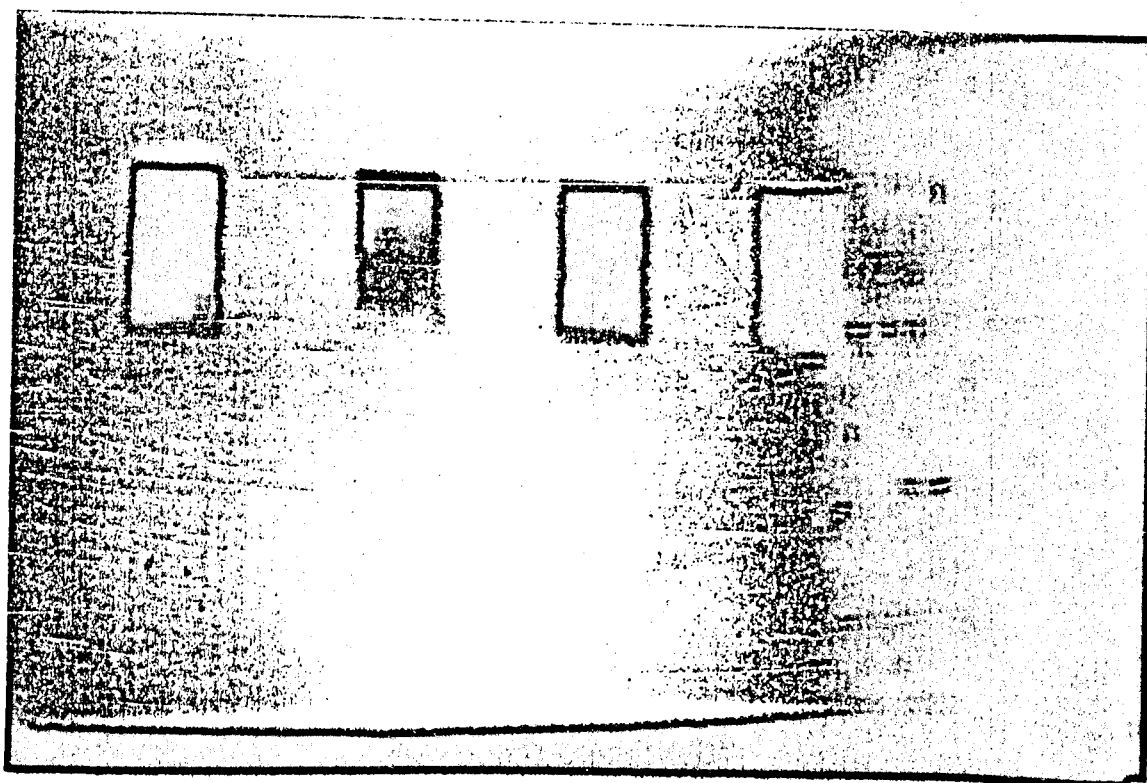
Nota: O facto de aparecerem referências de provetes repetidas nos resultados dos ensaios, deve-se à existência de duas faces revestidas nos referidos provetes, tendo sido efectuados ensaios em ambas.



Fotografia 4 - Provetes de aço CK45 revestidos com ZrN.



Fotografia 5 - Provetes de aço CK45 revestidos com TiN.



Fotografia 6 - Provetes revestidos com TiN. À direita temos um provete sem revestimento.

2.3-Ensaaios de desgaste

A realização dos ensaios de desgaste teve por objectivo determinar o coeficiente de atrito dos revestimentos, bem como, a carga crítica que estes suportam. Com a análise destes parâmetros pretende-se aquilatar da eficiência destes revestimentos quando sujeitos a cargas dinâmicas.

Estes ensaios permitem também estabelecer uma correlação entre a dureza do substrato e a eficiência do filme (revestimento).

2.3.1-Descrição dos ensaios

Todos os ensaios foram realizados utilizando o mesmo patim em aço, o qual foi devidamente polido e limpo após a realização de cada ensaio.

Os parâmetros de ensaio comuns a todos os provetes são:

.Curso: 32mm

.Velocidade de rotação do tribómetro: 350 RPM

Quanto às cargas utilizadas, estas foram sendo variadas em função da resistência revelada pelos provetes.

Afim de testar a validade dos resultados sucessivamente obtidos foram efectuados ensaios num provete sem revestimento, a seco e com lubrificação (óleo), e ainda, em provetes revestidos usando também lubrificação, os quais nos permitiram concluir da eficácia dos resultados obtidos.

Com este fim foi também sendo feita regularmente a calibração das cargas utilizadas.

Em anexo são apresentados os gráficos dos diferentes ensaios de desgaste efectuados.

3-RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS

Os resultados experimentais obtidos encontram-se resumidos no Quadro I.

QUADRO I - Resumo dos resultados obtidos

Nº ENSAIO	PROVETE	CARGA [N]	Nº CICLOS	REVESTIMENTO	COEF. ATRITO	OBSERVAÇÕES
1	TiN (808)	30	200	Parte	0,65	A
			400	•	0,82	B
			600		0,07	C
2	Aço CK45 sem revestimento	30	200		0,21	D
			400		0,17	E
			600		0,06	F
3	N1 Ti	10	500	Não parte	2,6	G
4	N2 Ti	30	150	Parte	1,07	H
5	N2 Ti	23,5	100	•	1,4	I
6	N1 Ti	18,5	20	•	1,78	J
7	N3 Ti	14,1	50	•	1,95	K
8	N3 Ti	11,7	410	•	1,12	L
9	N1 Zr	11,7	100	•	1,99	M
10	N1 Zr	10	500	Não parte	2,71	N
11	N2 Zr	11,7	200	•	1,89	O
			500	•	2,5	P
			1000	•	2,75	Q

OBSERVAÇÕES

Ensaio N°1

A - Após partir o revestimento, verifica-se uma oscilação no gráfico devido a sujidade (partículas de revestimento na superfície de contacto patim/provete).

B - A estabilização do traçado do gráfico é devida a auto-limpeza. O elevado coeficiente de atrito deve-se à existência de parte do revestimento que ainda não foi arrancada.

C - O baixo coeficiente de atrito deve-se à lubrificação do provete e do patim.

Ensaio N°2

D - O coeficiente de atrito é constante, com pequenas alterações entre os 150 e os 200 ciclos devido a sujidade na área de contacto patim/provete.

E - Estabilização do traçado (coeficiente de atrito constante) motivado por auto-limpeza da interface patim/provete.

F - Verifica-se uma redução do coeficiente de atrito devido à existência de lubrificação, mantendo-se o seu valor constante até ao fim do ensaio.

Nota: O coeficiente de atrito obtido no ensaio do provete sem revestimento (aproximadamente 0.2) comprova a validade dos resultados, pois este é o valor esperado para um aço CK45.

Ensaio N°3

G - Nos primeiros 100 ciclos o traçado é constante e uniforme, verificando-se apenas um ligeiro aumento do coeficiente de atrito. A partir deste ponto verifica-se alguma irregularidade no traçado devido a sujidade provocada por partículas superficiais do revestimento que se destacam, mantendo-se no entanto o coeficiente de atrito constante.

Quando se atingiram os 360 ciclos, foi interrompido o ensaio e limpo o patim, do que resultou uma maior uniformidade no traçado e um abaixamento no coeficiente de atrito até aos 400 ciclos, altura em que a sujidade voltou a provocar alterações.

Deve no entanto salientar-se que o revestimento nunca cedeu muito embora apresenta-se sinais de desgaste.

Ensaio N°4

H - Verifica-se que o revestimento cede logo nos primeiros ciclos, devido à carga aplicada ser demasiado elevada.

Ensaio N°5

I - A um abaixamento da carga relativamente ao ensaio N°4, correspondeu um aumento do número de ciclos a que o revestimento resistiu, no entanto verifica-se que este cede cerca dos 60 ciclos.

Ensaio N°6

J - Neste ensaio, e apesar de um abaixamento no valor da carga aplicada, o revestimento cede muito rapidamente, o que eventualmente pode atribuir-se a irregularidades superficiais deste, e problemas de aderência na interface substrato/revestimento.

Ensaio N°7

K - Considerações idênticas às do ensaio N°6.

Ensaio N°8

L - Neste ensaio, a carga aplicada é mais baixa do que nos ensaios 4, 5, 6 e 7, verificando-se um aumento significativo do "tempo de vida" do revestimento, apresentando-se o traçado do gráfico bastante uniforme, e com um coeficiente de atrito aproximadamente constante.

O revestimento só cede ao fim de 410 ciclos.

Ensaio N°9

M - O traçado do gráfico apresenta algumas oscilações, acabando o revestimento por ceder cerca dos 80 ciclos.

Ensaio N°10

N - Neste caso o coeficiente de atrito apresenta-se praticamente constante ao longo de todo o ensaio, sendo o traçado do gráfico muito uniforme.

O revestimento acaba por ceder cerca dos 800 ciclos.

Ensaio N°11

O - Este ensaio é uma repetição do ensaio N°9, com a exceção de que o provete foi previamente polido. Nos primeiros 200 ciclos o coeficiente de atrito mantém-se constante.

P - Entre os 200 e os 500 ciclos verifica-se um importante aumento do coeficiente de atrito.

Q - A partir dos 500 ciclos começam a aparecer riscas na superfície do revestimento, sem que contudo este ceda totalmente. Esta situação manteve-se até aos 1000 ciclos, altura em que foi interrompido o ensaio. Deve salientar-se que nesta altura o revestimento apresentava evidentes sinais de desgaste.

3.1-Considerações sobre os resultados experimentais obtidos

Verifica-se a existência de uma carga crítica para a qual os revestimentos cedem.

No ensaio N°1, verificou-se que a carga aplicada era muito elevada situando-se muito para além da carga crítica.

O ensaio N°3, mostrou que o valor carga (10 Kg) estava abaixo da carga crítica pelo que foram realizados sucessivamente os ensaios 4,5,6,7 e 8, partindo de cargas elevadas (30 Kg) até valores mais baixos (11.7 Kg), tendo-se verificado que mesmo para este último valor o revestimento cedia.

Pode então dizer-se que a **carga crítica** para os provetes ensaiados revestidos com TiN, se situa **entre 10 e os 11.7 Kg**.

O ensaio N°9 revelou que uma carga de 11.7 Kg é superior à carga crítica para um provete revestido com ZrN. No entanto, a superfície deste provete apresentava alguma rugosidade.

Do ensaio N°10 pode dizer-se que o valor da carga crítica para os provetes de ZrN é superior a 10 Kg.

O ensaio N°11 mostra que se a superfície do revestimento fôr devidamente polida, o valor da carga crítica sofre um incremento, pois embora a carga utilizada fosse idêntica à do ensaio N°9, o revestimento resistiu durante um número muito maior de ciclos.

Com o objectivo de se poderem generalizar estes resultados e uma vez que se conhecem as áreas de contacto patim/provete dos ensaios efectuados, procedeu-se à "transformação" das cargas críticas em **tensões críticas**.

Provetes com revestimento de TiN

Provete	Carga [N]	Área de contacto [mm ²]	Tensão [Kg/mm ²]
N1Ti	10	39	2.61E-02
N3Ti	11.7	60	1.99E-02
Média			2.3E-02

Provetes com revestimento de ZrN

N1Zr	10	75	1.36E-02
N1Zr	11.7	90	1.32E-02
Média			1.34E-02

4-CONCLUSÕES

Da análise dos resultados experimentais obtidos são várias as conclusões que se podem tirar. Assim temos:

- Os revestimentos duros de TiN e ZrN, apresentam melhor resistência ao desgaste quando são devidamente polidos.

A existência de rugosidades superficiais e de irregularidades, provocam um decréscimo significativo no "tempo de vida" dos revestimentos.

- Os revestimentos devem apresentar uma microestrutura constante e uma espessura uniforme afim de garantirem um bom comportamento ao desgaste.

- Apesar dos resultados obtidos com a utilização destes revestimentos serem normalmente muito bons, os substratos devem apresentar uma dureza mínima (não podem ser demasiados macios). Isto deve-se ao facto de que um substrato macio mesmo quando revestido por um filme duro, sofre uma grande deformação quando sujeito a cargas elevadas. Estas podem não ser muito elevadas para o revestimento duro, mas são-o no entanto, para o revestimento que é macio. Nestas condições verifica-se que as peças revestidas sofrem um desgaste precoce.

- Existe uma carga crítica para a qual os revestimentos cedem. Esta carga crítica depende não só das características do filme, mas também das características do substrato e da interface entre eles. A tensão crítica é muito maior quando temos revestimentos de TiN do que quando temos revestimentos de ZrN.

- Os coeficientes de atrito obtidos nos ensaios realizados, apresentam valores muito elevados, que não correspondem aos esperados, sem que se consiga estabelecer uma relação objectiva entre eles. Pode contudo referir-se que os provetes revestidos com ZrN apresentam de uma maneira geral coeficientes de atrito superiores aos provetes revestidos com TiN.

A experiência adquirida com a realização deste trabalho, veio confirmar que os revestimentos duros são indubitavelmente uma solução de futuro, podendo a sua aplicação ser efectuada numa vasta gama de materiais. Todavia, a investigação e o desenvolvimento, aliados a uma maior divulgação a nível industrial, revelam-se necessários para que os revestimentos duros ganhem um maior incremento na sua aplicação.



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000101462