FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Revestimentos duros ultrafinos executados por P.V.D.

Francisco José Gomes da Silva

Licenciado em Engenharia Mecânica
pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos
requisitos do grau de mestre
em
Engenharia Mecânica
(Área de Materiais e Processos de Fabrico)

0437
SIL4/REV
621(043)
7446
29 04 97

Dissertação realizada sob a supervisão de

Professor Doutor Luís Andrade Ferreira

do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Janeiro de 1997

RESUMO

O presente trabalho teve como objectivo proceder ao estudo do comportamento tribológico de superfícies revestidas pelo processo PVD (Phisical Vapour Deposition). Para o efeito, foram utilizados como substrato um aço AISI 52100, e como revestimentos o nitreto de titânio, nitreto de zircónio, e nitreto de titânio-zircónio.

O trabalho experimental foi realizado no laboratório de tribologia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Para a realização dos ensaios, foi utilizado um tribómetro de Blouet, que proporcionou a obtenção de um contacto conforme entre a pista e o patim.

Foi imposta para todos os ensaios uma carga fixa de 70 N. Foram escolhidas duas velocidades de deslizamento diferentes, 1 e 3 m/s, com vista ao estudo da influência da velocidade no desgaste das superfícies. Foram colocadas em contacto todas as combinações possíveis de superfícies revestidas e do substrato sem revestir, excepção feita ao contacto entre dois substratos não revestidos, por não se enquadrar dentro dos objectivos deste trabalho. Foi realizado um ciclo de ensaios com o contacto seco entre todos os pares de superfícies indicadas, e outro com o contacto lubrificado entre esses mesmos pares de superfícies.

A caracterização das superfícies após o revestimento, e antes da realização dos ensaios, foi efectuada através da análise da rugosidade das superfícies, medição da dureza, e observação e análise por SEM e EDS.

A caracterização do comportamento dos diversos pares de superfícies ensaiados, nas condições referidas, foi realizada através da quantificação da massa perdida pelo patim, do registo e análise do coeficiente de atrito ao longo do ensaios, e por análise SEM e EDS das superfícies.

ABSTRACT

The present research had as objective to proceed the study of tribological behaviour of PVD coated surfaces. To the effect, as subtract was utilised the AISI 52100 steel, and TiN, ZrN and (Ti,Zr)N as coating.

The experimental work as been made in tribologic laboratory of FEUP. To tests a Blouet tribometer was utilised that gave a conformal contact between the block and ring.

To this tests a normal load of 70 N was applied. Two sliding velocities has been selected, 1 and 3 m/s, to the research of wear surfaces levels. All the combinations of coated surfaces and uncoated surfaced has been applicated. A cycle of tests was performed whit a dry contact in the pair of surfaces and another one with lubricated contacts to the same pairs.

Before the tests, a surface characterisation after coating has been made through the analysis of surface roughness, hardness evaluation and morphology analysis by SEM and EDS.

The behaviour characterisation of different kinds of tested surfaces, has been made through weight evaluation of block loose and the registration and analysis of friction through tests and SEM and EDS surface analysis.

RÉSUMÈ

Ce travail avait comme objectif d'étudier le comportement tribologique de surfaces revêtues avec PVD (Phisical Vapour Deposition). Pour l'effect, on a utilisé de l'acier AISI 52100, et comme revêtement, le TiN, le ZrN et le (Ti,Zr)N.

Ce travail expérimental a été réalisè dans le laboratoire de tribologie de la FEUP. Pour les essais on a utilisè un trimomètre de Blouet, qui a permis um contact ajustá entre la piste et le patin.

Pour tous les essais, on a appliqué une charge fixe de 70 N. On a choisi deux velocités different's de glissement, 1 et 3 m/s, afin d'etudier l'influence de la velocité dans la dégradation des surfaces. On a essayé tous les combinations possibles des surfaces revêtues et du substract sans revêtement, à l'exception de deux substracts non revêtues car ils ne font pas l'object de ce travail. Un cicle d'essais au contact sec a été entre tous les pairs de surfaces déjà indiquées et un autre au contact lubrifiè entre la meme pair de surfaces.

La caracterization des pieces après le revêtement, et avant la realization de les essais, a été effectuè par l'analyse de la rugosité des surfaces, le mesurage de la dureté, et l'observation et l'analyse par SEM et EDS.

La caraterization du comportement des pairs de pieces essayées, a été réalizèe par le mesurage de la masse perdue par le patin, le registre et l'analyse du coefficient de friction tout au long des essais et, par l'analyse SEM et EDS des surfaces.

PREFÁCIO

Os revestimentos duros ultrafinos têm visto a sua utilização fortemente incrementada nos últimos anos. A técnica de revestimentos de superficie por PVD (Phisical Vapour Deposition), tem assumido particular destaque entre as várias técnicas de execução de revestimentos, devido ao facto de possuir um vasto conjunto de factores que tornam o processo muito versátil, e de fácil realização.

A deposição de revestimento ultrafinos pelo processo PVD apresenta várias vantagens, das quais cumpre destacar as seguintes: baixa temperatura desenvolvida durante o processo de deposição, e possibilidade de execução de revestimentos de materiais não metálicos, e/ou sobre substratos não metálicos.

As vantagens indicadas, aliadas a uma óptima adesão do revestimento ao substrato, permitem o mais diversificado tipo de aplicações. Apesar desta técnica ter sido descoberta há algumas décadas, só nos anos 80 foi encarada como solução para alguns problemas tribológicos.

A procura de uma fiabilidade acrescida para uma grande parte dos componentes mecânicos sujeitos a forte desgaste tem levado ao estudo intensivo de novos materiais a serem utilizados como revestimento e ao desenvolvimento de diversas variantes do próprio processo PVD.

Este trabalho teve por objectivo contribuir para um melhor conhecimento do comportamento tribológico dos materiais utilizados como revestimento, segundo várias condições de contacto impostas nos diversos ensaios efectuados.

Este dissertação contou com o precioso apoio do seu supervisor, Professor Doutor Luís Andrade Ferreira, a quem gostaria de apresentar os meus reconhecidos agradecimentos, extensivos a todas as pessoas e entidades que, de forma directa ou indirecta, contribuíram para a realização deste trabalho, e que são as seguintes:

Prof. Doutor António Paulo Monteiro Baptista, pelo precioso apoio concedido na realização dos ensaios.

Eng.° Armando Campos, pelo precioso apoio dado na medição da rugosidade das superficies.

Prof. Doutor Carlos Sá, pelo precioso apoio concedido na caracterização das superficies, e pela preciosa colaboração prestada na realização do trabalho fotográfico.

Eng.° Aníbal Carreira, pelo esforço realizado na execução dos revestimentos.

ÍNDICE

RESUMO 2
PREFÁCIO 4
ÍNDICE 5
LISTA DE FIGURAS E QUADROS 9
LISTA DE ABREVIATURAS E SÌMBOLOS 16
GLOSSÁRIO 17
1. ESTUDO BIBLIOGRÁFICO 18
1.1 INTRODUÇÃO 18
1.2 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS 19
1.2.1 Protecção das superfícies 19
1.2.2 Os revestimentos 21
1.2.3 Variáveis de um processo tribológico de contacto 25
1.2.3.1 Modificações macromecânicas 26
1.2.3.1.1 - Deformação plástica 27
1.2.3.1.2 - Desgaste por adesão e fadiga 28
1.2.3.1.3 - Abertura de sulcos por rugosidade excessiva 28
1.2.3.1.4 - Partículas que riscam 28
1.2.3.1.5 - Fractura do revestimento 29
1.2.3.1.6 - Fractura devida a rugosidades excessivas 30
1.2.3.1.7 - Delaminação 30
1.2.3.1.8 - Desgaste abrasivo 31
1.2.3.2 - Modificações micromecânicas 31
1.2.3.3 - Modificações triboquímicas 32
1.2.3.3.1 - Formação de microfilmes nos revestimentos duros 33
1.2.3.3.2 - Oxidação dos revestimentos macios 33
1.2.3.4 - Transferência de material 34
1.2.4 - O estudo do comportamento das superfícies revestidas 34
1.3 MÉTODOS DE PROTECÇÃO DAS SUPERFÍCIES 35
1.3.1 Tratamentos com modificação localizada da estrutura cristalina 36
1.3.2 Tratamentos com modificação localizada da composição química 36

1.3.3 Aplicação de revestimentos 37
1.3.3.1 - Métodos de revestimento tradicionais 38
1.3.3.2 - Métodos de revestimento modernos 40
1.3.3.2.1 - Processo CVD (Chemical Vapour Deposition) 44
1.4 O processo PVD 46
1.4.1 - Métodos físicos de deposição em fase de vapor (PVD) 47
1.4.2 O método "Sputtering" (Projecção catódica) 48
1.4.3 - Variantes do processo de deposição por projecção catódica 51
1.4.4 - Elementos fundamentais ao processo 55
1.4.4.1 Câmara de deposição 56
1.4.4.2 Sistema de vácuo 56
1.4.4.3 Fornecimento de energia 57
1.4.4.4 Alvo 58
1.4.4.5 - Os substratos 59
1.4.4.6 Acessórios 59
1.4.5 - Aplicações 59
1.4.5.1 - Decoração e óptica 60
1.4.5.2 - Biomedicina 60
1.4.5.3 - Tribologia 61
1.4.6 Avaliação e caracterização das superfícies revestidas por PVD 61
1.4.6.1 Caracterização das superfícies 63
1.4.6.1.1 Rugosidade 63
1.4.6.1.2 Espessura 63
1.4.6.2 Análise das propriedades mecânicas 65
1.4.6.2.1 - Dureza 65
1.4.6.2.2 Adesão 66
1.4.6.3 Estudo do comportamento tribológico 68
1.4.6.3.1 Configuração "pino em disco" 70
1.4.6.3.1.1 Configuração esquemática do ensaio 70
1.4.6.3.1.2 Objectivos do ensaio 70
1.4.6.3.1.3 Provetes 70
1.4.6.3.1.4 Condições típicas de ensaio 70
1.4.6.3.1.5 Parâmetros a avaliar 71

1.4.6.3.1.6 Aplicações e comentários 71
1.4.6.3.2 Configuração "patim em pista" 71
1.4.6.3.2.1 Configuração esquemática do ensaio 71
1.4.6.3.2.2 Objectivos do ensaio 72
1.4.6.3.2.3 Provetes 72
1.4.6.3.2.4 Condições típicas de ensaio 72
1.4.6.3.2.5 Parâmetros a avaliar 72
1.4.6.3.2.6 Aplicações e comentários 72
1.4.6.3.3 Configuração "pino em plano" 73
1.4.6.3.3.1 Configuração esquemática do ensaio 73
1.4.6.3.3.2 Objectivos do ensaio 73
1.4.6.3.3.3 Provetes 73
1.4.6.3.3.4 Condições típicas de ensaio 73
1.4.6.3.3.5 Parâmetros a avaliar 74
1.4.6.3.3.6 Aplicações e comentários 74
1.4.6.3.4 Configuração "Bloco em pino" 74
1.4.6.3.4.1 Configuração esquemática do ensaio 74
1.4.6.3.4.2 Objectivos do ensaio 74
1.4.6.3.4.3 Provetes 75
1.4.6.3.4.4 Condições típicas de ensaio 75
1.4.6.3.4.5 Parâmetros a avaliar 75
1.4.6.3.4.6 Aplicações e comentários 75
1.4.6.3.5 Equipamentos laboratoriais de estudo do comportamento tribológico 76
1.4.6.3.5.1 Equipamento para realização de ensaios "pino em disco" 76
1.4.6.3.5.2 Equipamento para a realização de ensaios "patim em pista" 77
1.4.7 - Resumo do "estado da arte" 79
1.4.7.1 - Coeficiente de atrito 79
1.4.7.2 - Desgaste 84
1.4.7.3 - Mecanismos de desgaste 86
2. TRABALHO EXPERIMENTAL 88
2.1 - Selecção dos materiais 88
2.2 - Preparação dos provetes 89
2.3 - Análise das superfícies 90

2.3.1 - Análise da morfologia das superfícies 91
2.3.2 - Análise e quantificação da espessura da película de revestimento 93
2.3.3 - Análise da composição da película 99
2.3.4 - Rugosidade 101
2.3.5 - Dureza 102
2.4 - Selecção das condições de ensaio 103
2.4.1 - Configuração utilizada 103
2.4.2 Carga 103
2.4.3 - Velocidade 104
2.4.4 - Lubrificante 104
2.5 - Plano de ensaios 104
2.6 - Selecção das variáveis a controlar 107
2.7 - Apresentação e análise dos resultados 107
3. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS 160
3.1 Conclusões 160
3.2 - Propostas para futuros trabalhos 161
REFERÊNCIAS 162
ANEXO A NORMA ISO 7148/1 166
ANEXO B PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS 175
ANEXO C MEDIÇÃO DE RUGOSIDADES 186
ANEXO D COMPARAÇÃO DE RUGOSIDADES DAS SUPERFÍCIES 211
ANEXO E RELATÓRIOS DE ENSAIO 214
ANEXO F QUADRO / RESUMO DE RESULTADOS OBTIDOS EM TRABALHOS EXPERIMENTAIS REALIZADOS COM REVESTIMENTOS EFECTUADOS POR P.V.D. (Holmberg e Matthews,1994) 275
CURRICULUM VITAE 284

LISTA DE FIGURAS E QUADROS

Figura 1.1 - Diferentes zonas de uma superfície revestida 23

Figura 1.2 - Exemplos dos factores que influenciam as propriedades das superfícies revestidas(Holmberg e Matthews, 1994) 24

Figura 1.3 Variáveis de um processo tribológico de contacto entre duas superfícies em contacto e com movimento relativo 25

Figura 1.4 Mecanismos de desgaste num contacto revestido tendo em conta a dureza, espessura, rugosidade do revestimento e as partículas de desgaste libertadas. (Holmberg e Matthews, 1994) 27

Figura 1.5 - Zonas que constituem o contacto entre uma superfície revestida e uma superfície não revestida (Holmberg e Matthews, 1994) 32

Figura 1.6 - Intervalos de variação da espessura do revestimento e temperatura de processamento para diferentes técnicas de revestimento. 41

Figura 1.7 - Representação esquemática da influência da temperatura do substrato e da pressão do gás na microestrutura do metal do revestimento, tendo sido usado um processo de deposição por pulverização catódica. T/Tf representa a relação existente entre a temperatura do processo e a temperatura de fusão do material do revestimento. 44

Figura 1.8 - Zonas de reacção no processo CVD (Holmberg e Matthwes, 1994) 45

Figura 1.9 - Algumas das variantes do processo de revestimento físico em fase de vapor 47

Figura 1.10 - Algumas das variantes do processo de revestimento físico em fase de vapor por plasma assistido. 48

Figura 1.11 - Processo de bombardeamento de iões sobre o alvo, e consequente reacção (Material Research Corporation) 50

Figura 1.12 - Representação esquemática das diferentes regiões criadas dentro da câmara de deposição, e respectivo posicionamento (Material Research Corporation). ... 51

Figura 1.13 - Representação esquemática de um sistema de deposição catódica (Material Research Corporation). 52

Figura 1.14 - Representação esquemática de um sistema de deposição catódica auxiliada por "magnetron" (Material Research Corporation). 54

Figura 1.15 - Forma como o alvo vai ser consumido localizadamente 55

Figura 1.16 - Forma como é analisada a espessura do revestimento por cada um dos métodos indicados. (Holmberg e Matthwes, 1994) 64

Figura 1.17 - Geometria do penetrador Vickers (a) e Knoop (b) 65

Figura 1.18 - Representação esquemática de um ensaio tipo "Pull-off" 67

Figura 1.19 - Representação esquemática do princípio utilizado na realização de um "Scratch-test" 68

Figura 1.20 - Representação esquemática do ensaio de deslizamento tipo "pino em disco ... 70

Figura 1.21 - Representação esquemática do ensaio "patim em pista" 71

Figura 1.22 - Representação esquemática do ensaio tipo "pino em plano" 73

Figura 1.23 - Representação esquemática do ensaio tipo "Bloco em pino" 74

Figura 1.24 - Representação esquemática do equipamento de ensaio "pino em disco", provido de câmara de controlo de humidade e temperatura. (Holmberg e Matthwes, 1994) 77

Figura 1.25 - Representação esquemática do tribómetro de Blouet 78

Figura 1.26 - Coeficientes de atrito registados a diferentes velocidades de deslizamento, para um contacto seco entre um pino de aço a deslizar sobre um disco revestido a TiN. (Holmberg e Matthwes, 1994) 80

Figura 1.27 - Coeficientes de atrito registados com as diferentes formas cristalográficas dos nitreto de boro (Holmberg e Matthwes, 1994). 82

Figura 1.28 - Evolução do coeficiente de atrito no contacto TiN-TiN ao longo de um deslizamento de 1000 metros, com meios ambientes diferentes (Holmberg e Matthwes, 1994) 83

Figura 1.29 - Representação gráfica do coeficiente de atrito no contacto de deslizamento seco entre uma superfície revestida a Cr_2O_3 e outra de aço AISI D2, sujeito a uma carga de 61,3 N. (Wang et al., 1996) 84

Figura 1.30 - Evolução do volume de desgaste registado ao longo de um ensaio tipo "patim em pista" efectuado por Wang et al.(1996), com superfícies revestidas a Cr_2O_3 em contacto com aço AISI D2. 85

Figura 1.31 - Desgaste em função da carga no contacto seco entre uma superfície revestida a Cr_2O_3 e outra de aço AISI D2 a diferentes velocidades.(Wang et al., 1996) 86

Figura 2.1 - Desenho do patim e pista utilizados nos ensaios 89

Figura 2.2 - Aspecto da morfologia da superfície revestida a TiN, ampliada 4000 vezes 91

Figura 2.3 - Aspecto da morfologia da superfície revestida a (Ti,Zr)N, ampliada 4000 vezes 92

Figura 2.4 - Aspecto da morfologia da superfície revestida a ZrN, ampliada 4000 vezes 92

Figura 2.5 - Película de TiN observada de topo por SEM, e ampliada 4000 vezes 93

Figura 2.6 - Película de ZrN observada de topo por SEM e ampliada 4000 vezes 94

Figura 2.7 - Película de (Ti,Zr)N observada de topo por SEM e ampliada 4000 vezes 94

Figura 2.8 - Duplicado da imagem da figura 2.7, obtida com recurso a electrões secundários retrodifundidos 95

Figura 2.9 - Espectro da composição da camada superior do revestimento de (Ti, Zr) N, obtido por EDS 96

Figura 2.10 - Espectro da composição da camada inferior do revestimento de (Ti, Zr) N, obtido por EDS 97

Figura 2.11 - Morfologia da camada superior e inferior do revestimento de (Ti,Zr)N, comparativamente ao substrato 98

Figura 2.12 - Espectro da composição do revestimento de TiN, obtido por EDS 99

Figura 2.13 - Espectro da composição do revestimento de (Ti, Zr) N, obtido por EDS 100

Figura 2.14 - Espectro da composição do revestimento de ZrN, obtido por EDS 100

Figura 2.15 - Gráfico comparativo da dureza Vickers do substrato e das superfícies revestidas 102

Figura 2.16 - Gráfico da perda de massa do patim no contacto seco com uma pista não revestida (C220) 110

Figura 2.17 - Gráfico da perda de massa do patim no contacto seco com uma pista revestida a TiN 111

Figura 2.18 - Gráfico da perda de massa do patim no contacto seco com uma pista revestida a ZrN 112

Figura 2.19 - Gráfico da perda de massa do patim no contacto seco com uma pista revestida a (Ti, Zr)N 113

Figura 2.20 - Gráfico da perda de massa no contacto lubrificado com uma pista não revestida (C220) 114

Figura 2.21 - Gráfico da perda de massa no contacto lubrificado com uma pista revestida a TiN 115

Figura 2.22 - Gráfico da perda de massa no contacto lubrificado com uma pista revestida a ZriN 116

Figura 2.23 - Gráfico da perda de massa no contacto lubrificado com uma pista revestida a (Ti, Zr)N 117

Figura 2.24 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista não revestida (V= 1m/s) 118

Figura 2.25 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista revestida a TiN (V= 1m/s) 119

Figura 2.26 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista revestida a ZrN (V= 1m/s) 120

Figura 2.27 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista revestida a (Ti,Zr)N (V= 1m/s) 121

Figura 2.28 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista não revestida (V= 3m/s) 122

Figura 2.29 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista revestida a TiN (V= 3m/s) 123

Figura 2.30 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista revestida a ZrN (V= 3m/s) 124

Figura 2.31 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista revestida a (Ti, Zr)N (V= 3m/s) 125

Figura 2.32 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista não revestida - C220 (V= 1m/s) 126

Figura 2.33 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista não revestida - C220 (V= 3m/s) 127

Figura 2.34 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a TiN (V= 1m/s) 128

Figura 2.35 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a TiN (V= 3m/s) 129

Figura 2.36 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a ZrN (V= 1m/s) 130

Figura 2.37 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a ZrN (V= 3m/s) 131

Figura 2.38 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a (Ti, Zr)N (V= 1m/s) 132

Figura 2.39 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a (Ti, Zr)N (V= 3m/s) 133

Figura 2.40 - Imagem de patim não revestido que deslizou sobre uma pista de TiN, onde poderá ser observado o alisamento do pico 134

Figura 2.41 - Imagem da mesma zona da foto anterior, obtida com electrões rectro-difundidos, onde poderá ser observado o alojamento de óxidos 135

Figura 2.42 - Imagem da superfície de uma pista revestida a ZrN, com películas de aço formadas na sua superfície por transferência de material (V = 1 m/s) 136

Figura 2.43 - Imagem em pormenor de uma zona da figura anterior, em que se pode observar o mecanismo de libertação de uma película de óxido da superfície de uma pista revestida a ZrN 136

Figura 2.44 - Imagem que ilustra o aspecto geral da formação de películas de óxidos na superfície de uma pista revestida a TiN, que esteve em contacto com um patim não revestido, com uma velocidade de deslizamento de 3 m/s. 137

Figura 2.45 - Imagem de uma zona particular da foto anterior 138

Figura 2.46 - Espectro efectuado por EDS a 25KV, analisando a película em profundidade, e revelando a existência de revestimento por baixo da película de óxido 139

Figura 2.47 - Espectro efectuado por EDS a 15KV, revelando a forte presença de óxidos de ferro provenientes da libertação de partículas de desgaste do não revestido..... 139

Figura 2.48 - Imagem da superfície de uma pista não revestida, com uma zona rectificada que não esteve em contacto, e uma zona de sulcos, correspondentes ao contacto com um patim revestido a (Ti,Zr)N..... 140

Figura 2.49 - Imagem idêntica à anterior, obtida com electrões secundários rectro-difundidos,..... 141

Figura 2.50 - Imagem da superfície de uma pista não revestida, em que são visíveis os sulcos provocados pelo contacto com o patim de (Ti,Zr)N e as películas de óxido formadas à superfície..... 142

Figura 2.51 - Imagem idêntica à anterior, efectuada com electrões rectro-difundidos, para confirmação da presença de óxidos..... 142

Figura 2.52 - Espectro da composição de uma zona limpa correspondente às fotos anteriores..... 143

Figura 2.53 - Espectro da composição de uma zona oxidada da mesma superfície não revestida..... 143

Figura 2.54 - Imagem que ilustra o aspecto da superfície de uma patim revestido a TiN, que esteve em contacto seco com uma pista provida do mesmo revestimento, a uma velocidade de 1 m/s 145

Figura 2.55 - Imagem da fractura ocorrida num pico do patim revestido a (Ti,Zr)N após ter sido posto em contacto com uma pista de TiN em contacto seco a 3 m/s ... 146

Figura 2.56 - Imagem da mesma zona da foto anterior, obtida com electrões secundário rectro-difundidos, e onde pode ser observada a zona visível do substrato 146

Figura 2.57 - Imagem da rotura localizada do revestimento de uma pista revestida a TiN, na zona de fronteira entre um sulco e uma zona não muito solicitada..... 147

Figura 2.58 - Imagem da mesma zona da foto anterior, obtida com electrões secundários rectro-difundidos, onde se pode observar nitidamente a parte visível do substrato..... 148

Figura 2.59 - Imagem da superfície de uma pista revestida a TiN que esteve em contacto seco com um patim revestido a TiN com velocidade de deslizamento de 1 m/s, onde pode ser observada a nucleação da rotura do revestimento..... 149

Figura 2.60 - Aspecto da superfície da pista revestida a TiN antes do contacto..... 150

Figura 2.61 - Aspecto da superfície da pista revestida a (Ti,Zr)N antes do contacto..... 150

Figura 2.62 - Imagem da superfície do patim revestido a ZrN que esteve em contacto de deslizamento seco com uma pista revestida a TiN à velocidade de 1 m/s 151

Figura 2.63 - Imagem da superfície do patim revestido a ZrN que esteve em contacto de deslizamento seco com uma pista revestida a TiN à velocidade de 3 m/s 152

Figura 2.64 - Imagem da superfície do patim não revestido que esteve em contacto de deslizamento seco com uma pista revestida a TiN à velocidade de 1 m/s 152

Figura 2.65 - Imagem da superfície do patim não revestido que esteve em contacto de deslizamento seco com uma pista revestida a TiN à velocidade de 3 m/s 153

Figura 2.66 - Imagem da superfície do patim revestido a (Ti,Zr)N que esteve em contacto lubrificado com uma pista revestida a TiN à velocidade de 1 m/s..... 153

Figura 2.67 - Imagem da superfície do patim revestido a (Ti,Zr)N que esteve em contacto lubrificado com uma pista revestida a TiN à velocidade de 3 m/s..... 154

Figura 2.68 - Imagem da superfície do patim revestido a TiN que esteve em contacto lubrificado com uma pista revestida a ZrN à velocidade de 1 m/s..... 154

Figura 2.69 - Imagem da superfície do patim revestido a TiN que esteve em contacto lubrificado com uma pista revestida a ZrN à velocidade de 3 m/s..... 155

Figura 2.70 - Imagem da superfície do patim revestido a TiN que esteve em contacto lubrificado com uma pista revestida a (Ti,Zr)N à velocidade de 1 m/s..... 155

Figura 2.71 - Imagem da superfície do patim revestido a TiN que esteve em contacto lubrificado com uma pista revestida a (Ti,Zr)N à velocidade de 3 m/s..... 156

Figura 2.72 - Imagem da superfície do patim revestido a TiN que esteve em contacto seco com uma pista não revestida, à velocidade de 3 m/s..... 156

Figura 2.73 - Imagem da superfície do patim revestido a ZrN que esteve em contacto seco com uma pista não revestida, à velocidade de 3 m/s..... 157

Figura 2.74 - Imagem da superfície do patim revestido a TiN que esteve em contacto seco com uma pista não revestida, à velocidade de 1 m/s..... 157

Figura 2.75 - Imagem da superfície do patim revestido a (Ti,Zr)N que esteve em contacto seco com uma pista não revestida, à velocidade de 1 m/s 158

Figura 2.76 - Imagem da superfície do patim não revestido que esteve em contacto lubrificado com uma pista de (Ti,Zr)N, à velocidade de 3 m/s 158

Figura 2.77 - Imagem da superfície do patim revestida a (Ti,Zr)N que esteve em contacto lubrificado com uma pista de (Ti,Zr)N, à velocidade de 3 m/s 159

Figura 3.1 - Gráfico de tendência relativo à perda de massa das superfícies ensaiadas 160

Figura 3.2 - Gráfico de tendência relativo ao coeficiente de atrito registado pelas superfícies ensaiadas 161

Quadro 1.1 - Probabilidade de ocorrência de corte, fractura elasticidade ou rolamento em cada uma das zonas do contacto (Holmberg e Matthews, 1994)..... 32

Quadro 1.2 - Grupos de processos de deposição e suas variantes..... 37

Quadro 1.3 - Resumo comparativo das propriedades dos processos de deposição modernos e de alguns processos tradicionais (Holmberg e Matthwes, 1994)..... 42

Quadro 2.1 - Quadro/Resumo dos resultados obtidos na caracterização da superfície dos patins..... 101

Quadro 2.2 - Quadro/Resumo dos resultados obtidos na caracterização da superfície das pistas..... 101

Quadro 2.3 - Plano de ensaios (não lubrificados)..... 105

Quadro 2.4 - Plano de ensaios (lubrificados) 106

Quadro 2.5 - Quadro/resumo de resultados dos ensaios não lubrificados 108

Quadro 2.6 - Quadro/resumo de resultados dos ensaios lubrificados 109

LISTA DE ABREVIATURAS E SÌMBOLOS

ABREVIATURAS

DIN - Deutsche Institute Norm
AISI - American Iron and Steel Institute

PVD - Phisical Vapour Deposition
PAPVD - Plasma Assisted Phisical Vapour Deposition
CVD - Chemical Vapour Deposition
PACVD - Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition

RF - Radio Frequency
DC - Direct Courrent

SEM - Scanning Electron Microscopy
EDS - Energy Dispersion Spectrometry

CETRIB - Unidade de Tribologia e Manutenção Industrial
CEMUP - Centro de Materiais da Universidade do Porto

SÍMBOLOS

Ra - Rugosidade média aritmética
Rz - Profundidade média da rugosidade
μ - Coeficiente de atrito
$\Delta\mu$ - Variação do coeficiente de atrito
HV - Dureza Vickers
HR - Humidade relativa

GLOSSÁRIO

Sputtering - Processo de deposição catódica

Gattering - Processo de purificação do gás dentro da câmara de deposição

Magnetron - Sistema gerador de campo eléctrico na câmara de deposição para aceleração iónica

1. ESTUDO BIBLIOGRÁFICO

1.1 INTRODUÇÃO

O objectivo desta dissertação é o de contribuir para o estudo do comportamento tribológico de superfícies revestidas, quando sujeitas a cargas elevadas e a velocidades de deslizamento apreciáveis, em condições de deslizamento seco e lubrificado.

No trabalho desenvolvido pretende-se caracterizar os tipos de desgaste presentes em cada situação, tendo por base as seguintes condições de deslizamento:

- Deslizamento sem lubrificação
- Deslizamento com lubrificação
- Deslizamento efectuado a duas velocidade diferentes.

Foram postos em contacto e ensaiados os diversos pares de provetes patim/pista correspondentes ás combinações possíveis entre todos os revestimentos utilizados e o substrato sem revestir. Foi excluído o ensaio superfície sem revestir/superfície sem revestir, por não se enquadrar no presente trabalho. Foram utilizadas superfícies revestidas com nitreto de titânio, nitreto de zircónio e nitreto de titânio e zircónio. Foi ainda utilizada a superfície do substrato sem revestir. A escolha do substrato recaiu sobre um aço AISI 52100.

Os ensaios consistiram em colocar em contacto dois provetes, um na forma de patim e outro na forma de pista, estando este último animado de um movimento de rotação previamente estabelecido e sujeitos a uma pressão de 0,28 MPa. Foi estabelecido como limite para a conclusão do ensaio a realização de 2000 ciclos.

Os trabalhos realizados e publicados até ao momento concentram os seus estudos em ensaios do tipo "Pin-on-Disc" (Pino sobre Disco), o que limita a carga aplicada a valores muito baixos, isto é, na ordem dos 2 a 10 N. A velocidade neste tipo de ensaio é também limitada a valores relativamente baixos. A realização deste trabalho no tribómetro de Blouet permitiu a aplicação de cargas mais elevadas, e a utilização de maiores velocidades de deslizamento.

A maioria dos trabalhos realizados até ao momento não inclui testes realizados com lubrificação, o que limita ainda mais a caracterização do comportamento das superfícies revestidas.

Na segunda secção são apresentadas algumas considerações teóricas sobre os aspectos tribológicos a ter em conta nas superfícies revestidas. É também analisado o conjunto de variáveis que determinam o comportamento das superfícies revestidas, e a forma como podem ser obtidos resultados por análise experimental.

Na terceira secção são referidos os diversos métodos de protecção das superfícies, sendo analisadas as respectivas vantagens e inconvenientes inerentes a cada processo.

A quarta secção é dedicado exclusivamente aos revestimentos efectuados por P.V.D., com destaque para todos os aspectos associados a este processo.

No segundo capítulo são apresentados os parâmetros de realização dos ensaios, sua justificação, e respectivos resultados.

No último capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho e propostos novos trabalhos.

1.2 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

1.2.1 Protecção das superfícies

As superfícies dos corpos são zonas onde as propriedades do material se encontram substancialmente alteradas. O facto da rede cristalina ser interrompida para que se forme a face do cristal leva a que o número de ligações dos átomos da superficie seja inferior ao número de ligações que qualquer átomo do interior da malha possui. A esse número mais restrito de ligações vai corresponder uma maior energia livre e uma actividade química superior.

Estas características evidenciadas pelas superfícies levam a que estas tenham normalmente maior apetência para estabelecerem ligações que lhes permitam aumentar a sua estabilidade química. A ocorrência de oxidação é um caso concreto de reacção das superfícies com o meio que as rodeia.

Factores como o aumento de temperatura ou forte solicitação mecânica, podem ainda contribuir para um incremento do poder reactivo das superfícies.

Face aos variados tipos de agressão a que as superfícies podem ser sujeitas, foram estudados métodos de protecção das mesmas, com o fim de melhorar a sua eficácia em serviço.

Desta forma, poderemos afirmar que a necessidade de tratamento das superfícies pode estar associada a factores tão diversos como:

- Melhoria da sua apresentação.
- Protecção contra a corrosão.
- Diminuição do coeficiente de atrito.
- Protecção contra o desgaste por abrasão, erosão, adesão, ou fadiga.

A melhoria da apresentação está muitas vezes associada à protecção contra a corrosão, e torna-se necessária em muitas aplicações correntes de uso quotidiano, tais como acessórios dos mais diversos tipos, normalmente fabricados apartir de aço em forma de chapa e obtidos por maquinagem ou deformação plástica.

A diminuição do coeficiente de atrito torna-se extremamente importante em casos onde se verifique deslizamento entre superfícies de dois ou mais componentes e onde se pretenda diminuir a energia consumida no contacto.

A protecção contra o desgaste assume particular destaque nas causas que levam à necessidade de protecção das superfícies. A diminuição do coeficiente de atrito e o aumento da resistência ao desgaste são características que se pretendem optimizadas, através de uma investigação constante, no sentido de se proceder à diminuição da energia consumida pelos contactos entre componentes, redução dos períodos de manutenção e incremento da fiabilidade e segurança dos equipamentos.

O desenvolvimento tecnológico verificado na indústria metalomecânica nas últimas décadas deu origem ao aparecimento de variados problemas no domínio dos materiais convencionais mais utilizados no fabrico de componentes mecânicos. As propriedades requeridas à superfície do material são muitas vezes incompatíveis com as solicitações mecânicas a que as peças são sujeitas durante o seu funcionamento. Propriedades de grande resistência ao desgaste, que implicam um incremento da dureza da superfície, são normalmente incompatíveis com a tenacidade muitas vezes pretendida para o substrato. A necessidade de conjugar propriedades da superfície distintas das propriedades do restante material obrigou a que se efectuassem estudos no sentido de se modificarem as propriedades da superfície, através de tratamentos ou deposição de outros materiais, com características mais adequadas à função específica da superfície, mantendo no substrato as propriedades requeridas à sua função específica.

No projecto de componentes mecânicos, é frequente colocarem-se ao projectista problemas de conjugação de propriedades de grande resistência ao desgaste por parte da superfície, acompanhada pela necessidade de grande tenacidade por parte do núcleo, com vista a uma adequada resistência do núcleo a esforços de variados tipos.

As soluções para este tipo de problema tão frequente poderiam passar por:

- Seleccionar um novo material cujas características assegurassem um bom compromisso entre as propriedades exigidas à superfície e ao núcleo.

- Alterar as características da superfície dos materiais convencionais através de tratamentos ou revestimentos da superfície.

A segunda solução torna-se geralmente a mais adequada, já que permite inclusivamente a conciliação de propriedades antagónicas entre a superfície e o núcleo. Sendo a solução mais conveniente é, também em muitos casos, a mais económica.

A modificação das características superficiais de um dado material poderão ser modificadas recorrendo a processos distintos:

- Por acção de atmosferas que conduzam à incorporação de um ou vários elementos na matriz do material de base, podendo ou não haver reacção com os elementos químicos existentes na solução sólida presente (Tratamentos Superficiais).
- Por deposição de um filme fino sobre a superfície do substrato (Revestimento).

Nos últimos anos, tem-se verificado um forte incremento na aplicação de revestimentos, bem como nos trabalhos realizados por muitos investigadores com vista à optimização de processos e materiais utilizados nos revestimentos.

1.2.2 Os revestimentos

Desde meados dos anos setenta, a indústria metalomecânica tem assistido a um desenvolvimento acentuado na utilização dos revestimentos. Foi contudo nos anos oitenta que se verificou o maior crescimento na utilização desta técnica de melhoramento das características superficiais dos componentes mecânicos.

O desenvolvimento dos revestimentos teve sempre como objectivos principais proteger as superfícies contra a corrosão e melhorar o comportamento tribológico dos componentes, principalmente quando estes estão sujeitos a acções de deslizamento. Nos últimos anos, a aplicação e estudo dos revestimentos finos tem tido como objectivo principal o incremento da resistência aos desgaste dos metais e diminuição do coeficiente de atrito.

Sabendo que o desgaste se caracteriza por uma perda progressiva de matéria pela superfície activa de um corpo, como resultado do movimento relativo dessa superfície em relação à superfície de um outro corpo e que situações de contacto entre componentes mecânicos nestas condições são extremamente frequentes, tem cabido aos investigadores da área da engenharia das superfícies e da tribologia desenvolver tecnologias adequadas ao melhoramento da eficácia das superfícies no que respeita à resistência a esse desgaste.

Convém referir que as situações de desgaste são muitas vezes agravadas pelo desenvolvimento de altas temperaturas no contacto, ou ainda pela presença de níveis excessivos de humidade. São exemplos deste tipo de situação os contactos provocados pelos seguintes elementos:

- Ferramentas de corte por arranque de apara
- Ferramentas de corte em prensa por deformação plástica
- Punções de ferramentas destinadas a embutidura
- Cames
- Rolamentos
- Engrenagens
- Etc.

A maior parte dos exemplos apresentados são casos em que se necessita simultâneamente de grande resistência ao desgaste por parte da superfície, e de grande tenacidade por parte do núcleo. O aumento da resistência ao desgaste passa por um aumento da dureza da superfície, o que colide com a grande tenacidade necessária ao núcleo, para resposta às fortes solicitações a que vai estar sujeito em serviço. Perante esta situação e com o conhecimento já adquirido dos diversos materiais convencionais, torna-se impossível conciliar num mesmo material propriedades que são antagónicas.

O desenvolvimento de tecnologias de deposição de materiais e o reconhecimento por parte da comunidade científica de que a superfície dos componentes mecânicos necessitava de um estudo específico aprofundado, foram e continuam a ser os principais responsáveis pelo elevado número de trabalhos de investigação e desenvolvimento na área dos revestimentos.

No aspecto tribológico, o revestimento poderá ser considerado como sendo uma camada, de espessura muito mais fina do que o substrato (material de base), que é depositado sobre este, com o objectivo de melhorar significativamente o coeficiente de atrito entre as superfícies em contacto, incrementando simultâneamente a sua resistência ao desgaste. Pretende-se assim que o revestimento possua uma função determinante no aquecimento e coeficiente de atrito do contacto.

Os processos de revestimento podem ser divididos em quatro grupos genéricos - gasosos, solução, fundidos e sólidos - dependendo do estado da fase de aplicação (Rickerby e Matthews,1991a). Neste trabalho será dado particular destaque aos processos de deposição no estado gasoso, já que são consideràvelmente mais atractivos no campo científico e comercial.

Para que possam ser alcançados os requisitos ideais, a superfície revestida deve possuir uma combinação apropriada de propriedades. Numa superfície revestida, poderemos considerar quatro zonas distintas, conforme o indicado na figura seguinte.

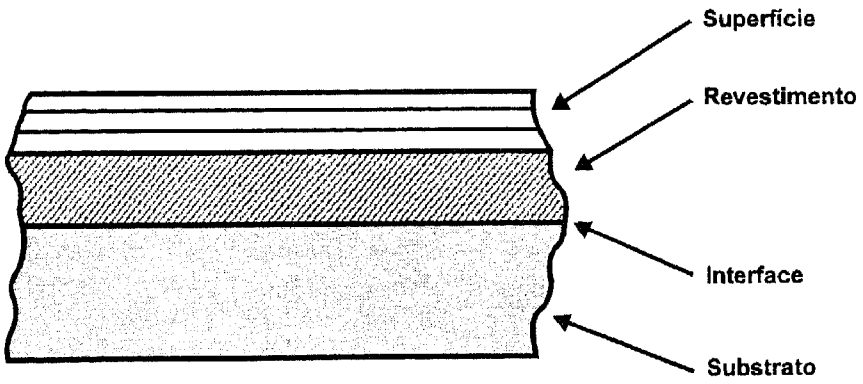


Figura 1.1 - Diferentes zonas de uma superfície revestida

Na superfície é requerida resistência a esforços de corte, reactividade química e nível de rugosidade adequado.

No revestimento são requeridas propriedades como dureza, elasticidade, tenacidade, resistência à fractura, condutibilidade e estabilidade térmica.

Na interface entre o revestimento e o substrato requere-se essencialmente adesão e resistência aos esforços de corte. Estas propriedades são de vital importância para o comportamento tribológico de uma superfície revestida.

Ao substrato requerem-se propriedades como expansão térmica, elasticidade, resistência à fractura, dureza e conductividade térmica.

Um dos aspectos a ter em conta no projecto de uma superfície revestida é o facto de, em muitos dos casos, não ser facilmente conciliável a obtenção de uma boa adesão entre o substrato e o revestimento, a prevenção de interacções da superfície com a superfície oposta, e uma alta dureza e resistência do revestimento. Normalmente, uma dureza e resistência acrescidas do revestimento implicam uma menor tenacidade e aderência (Holmberg e Matthews, 1994).

As propriedades requeridas ao material do revestimento são condicionadas essencialmente por três factores: constituição, parâmetros de fabrico e microestrutura, estando esta última dependente das duas primeiras.

De uma forma esquemática, poderemos dizer que as propriedades do material do revestimento estão condicionadas da seguinte forma:

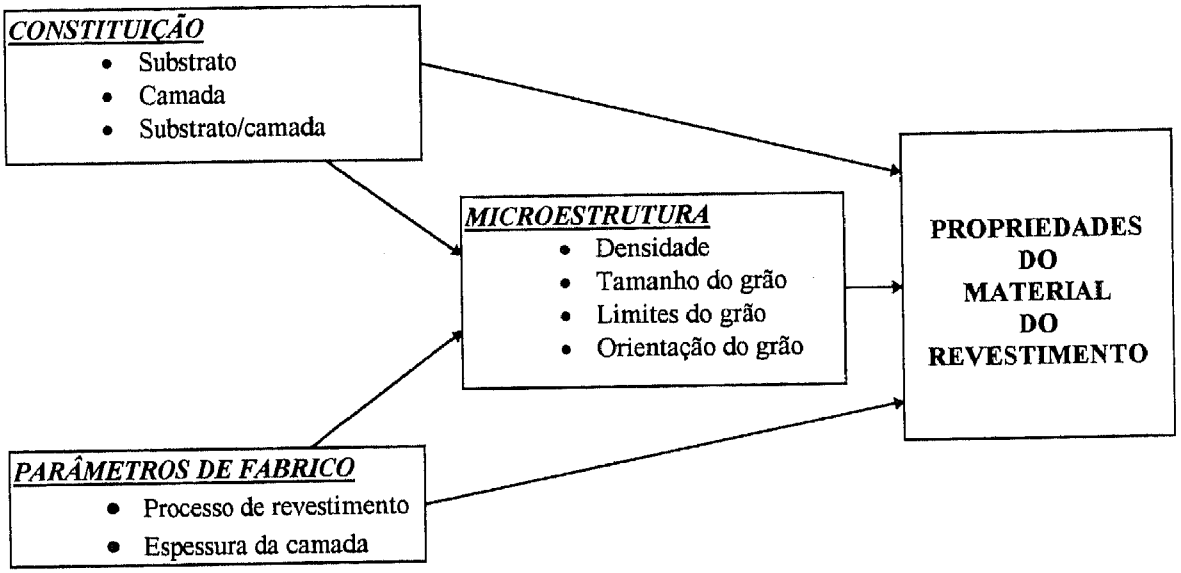


Figura 1.2 - Exemplos dos factores que influenciam as propriedades das superfícies revestidas(Holmberg e Matthews, 1994)

Existem ainda reacções químicas devidas ao atrito na zona de contacto (interface), que são críticas na maior parte dos sistemas. Na maior parte dos casos e após um período de atrito, verifica-se que há lugar á formação de compostos estáveis, compostos esses que passam a controlar a atrito subsequente e o comportamento do sistema ao desgaste. Com isto, o mecanismo de deslizamento é melhorado, podendo ainda ser alterado o comportamento térmico do sistema por modificação dos efeitos de difusão tanto térmica como química.

Após um estudo cuidado dos problemas que afectam um projecto, e uma selecção adequada do material do substrato, material do revestimento e método a utilizar no revestimento, é possível obter um sistema com um conjunto de propriedades de nível bastante superior ao patenteado por qualquer material convencional. Poderemos assim obter um sistema que nos permita reduzir fortemente o desgaste, aumentando a fiabilidade e segurança dos equipamentos.

1.2.3 Variáveis de um processo tribológico de contacto

A aplicação de revestimentos de superfície em componentes e ferramentas é actualmente uma das principais técnicas utilizadas a redução de falhas nos sistemas mecânicos. Nos exemplos de maior sucesso, o desgaste foi fortemente reduzido, e o tempo de vida dos equipamentos ampliado várias vezes.

Os resultados obtidos até ao momento foram no entanto obtidos unicamente por via experimental, graças ao estudo do comportamento do revestimento através da variação dos vários parâmetros importantes para o sistema tribológico, tais como: espessura do revestimento, dureza e rugosidade da superfície. Isto deve-se essencialmente à falta de um conceito teórico geral, que descreva satisfatoriamente o processo de atrito real, e os mecanismos de desgaste a ele subjacentes, quando estão envolvidas superfícies revestidas.

O conjunto de variáveis presentes num processo tribológico de contacto deslizante é complexo, podendo ser esquematizado da seguinte forma (Holmberg et al., 1992):



Figura 1.3 - Variáveis de um processo tribológico de contacto entre duas superfícies em contacto e com movimento relativo.

As modificações verificadas no sistema tribológico serão função do efeito e variação dos parâmetros de entrada do sistema. Essas mudanças podem ser divididas nos quatro grupos apresentados, apresentando cada um desses grupos características bem definidas.

No caso particular das superfícies revestidas, terão ainda que ser levados em conta os factores específicos que contribuem para a alteração de comportamento destas superfícies relativamente às superfícies convencionais.

1.2.3.1 Modificações macromecânicas

Os mecanismos macromecânicos de desgaste dependem essencialmente da carga e tensão distribuída em toda a superfície de contacto, das deformações elásticas e plásticas resultantes, das partículas de desgaste formadas pelo processo e da sua dinâmica. Em contactos que contenham uma ou mais superfícies revestidas, podem ser definidos quatro importantes parâmetros que controlam o processo tribológico, e que são os seguintes:

- Relação de dureza revestimento/substrato
- Espessura do revestimento
- Rugosidade da superfície
- Tamanho e dureza das partículas de desgaste no contacto

A relação entre estes quatro parâmetros resultará numa série de diferentes condições de contacto, que terão como consequência diversos tipos de desgaste. Na figura seguinte, e de uma forma sucinta, são apresentados os diversos tipos de desgaste, em função da espessura e dureza do revestimento, das características do substrato, e dos parâmetros que controlam o processo tribológico.

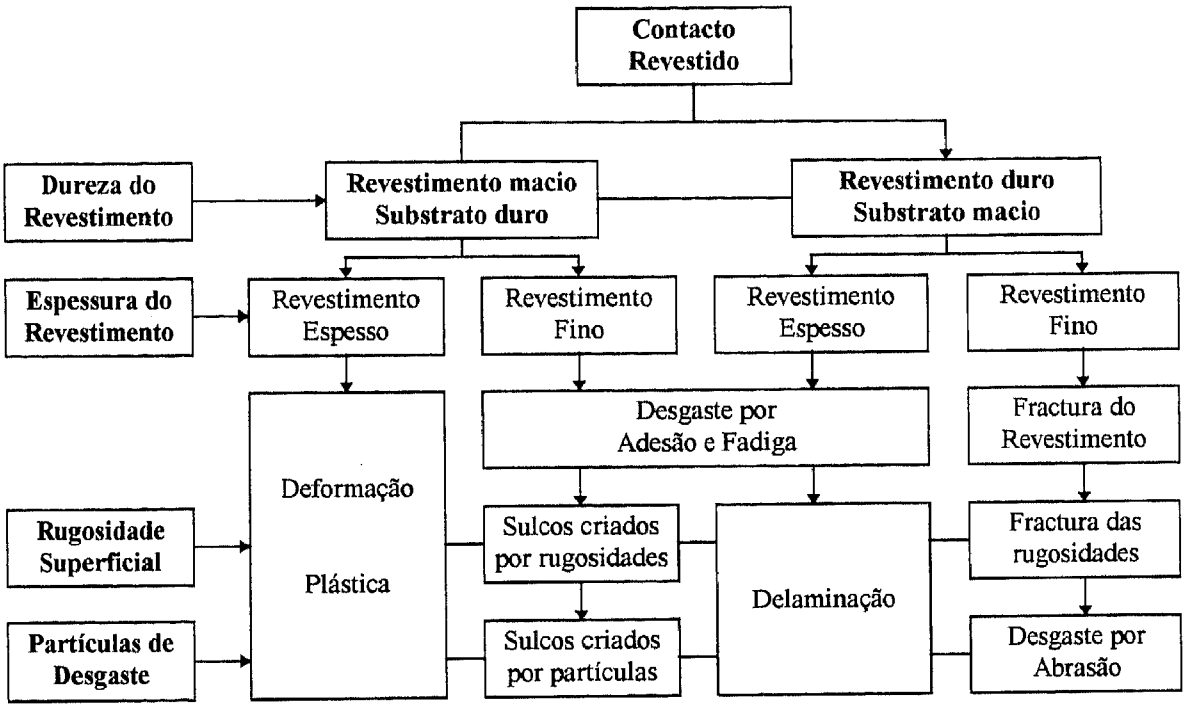


Figura 1.4 - Mecanismos de desgaste num contacto revestido tendo em conta a dureza, espessura, rugosidade do revestimento e as partículas de desgaste libertadas. (Holmberg e Matthews, 1994)

Com base no esquema anterior, poderemos verificar que, das doze situações de contacto apresentadas, resultam oito mecanismos de desgaste diferentes. A origem de cada um desses mecanismos de desgaste é explicada seguidamente, de uma forma resumida.

1.2.3.1.1 - Deformação plástica

Quando um corpo duro desliza sobre uma superfície provida de um revestimento macio, verifica-se que este sofre uma deformação plástica, causada pela transmissão da carga. A remoção do material pode ser estimada pela geometria do contacto. As partículas removidas da superfície não dão origem a qualquer outro mecanismo de desgaste, já que a sua dureza é relativamente baixa.

Quando se verifica desprendimento de partículas do corpo deslizante duro ou são introduzidas quaisquer outras partículas no contacto, verifica-se que estas se alojam ao longo do sulco formado pela passagem do corpo duro. A influência deste fenómeno tem uma importância quase insignificante no desgaste total do contacto.

1.2.3.1.2 - Desgaste por adesão e fadiga

O desgaste por adesão está presente em numerosas situações de contacto, podendo no entanto o seu efeito ser diminuto. Este mecanismo de desgaste é típico de um contacto formado por um corpo deslizante duro que se move sobre um revestimento macio fino depositado sobre um substrato duro ou sobre um revestimento espesso duro.

Poderá ocorrer ainda desgaste por fadiga, dependendo da material pelo qual é constituído o revestimento.

1.2.3.1.3 - Abertura de sulcos por rugosidade excessiva

Em contactos entre superfícies muito rugosas e superfícies providas de revestimentos finos macios, o mecanismo de penetração das rugosidades e microsulcagem é dominante. Contudo, segundo Roberts & Price (1989), existem casos interessantes que mostram que a rugosidade da superfície do substrato pode influenciar o desgaste, mesmo antes da penetração ter tido lugar. Este fenómeno poderá ser explicado pelo melhoramento da capacidade de transmissão da carga por parte das rugosidades da superfície revestida, ou ainda pelo decréscimo da tenacidade devida ao aumento da pressão sobre o revestimento.

Uma rugosidade excessiva num corpo duro que deslize sobre um revestimento macio, levará a que haja penetração do corpo duro no revestimento, até que este deslize directamente sobre o substrato. Se as rugosidades do corpo duro forem ainda mais duras que o substrato, provocarão sulcos e deformações, tanto no revestimento como no substrato.

Quando um corpo relativamente macio desliza sobre um substrato rugoso provido de um revestimento macio fino, verifica-se que numa primeira fase existe uma combinação de deformação plástica com desgaste por adesão, que provoca a diminuição da espessura do revestimento, até se dar o contacto entre o corpo deslizante e as rugosidades do substrato. Após esta primeira fase, regista-se um forte incremento do desgaste por adesão e aparecimento de sulcos, provocados pelo contacto entre o corpo deslizante e as rugosidades do substrato.

1.2.3.1.4 - Partículas que riscam

Este caso surge quando partículas com dimensão idêntica à espessura do revestimento, são introduzidas no contacto entre um corpo duro e um substrato rugoso sobre o qual ele desliza provido de um revestimento fino macio. As partículas serão absorvidas pela rugosidade do

corpo deslizante, originando microsulcos, tanto no revestimento macio como no substrato duro, de uma forma similar à descrita anteriormente. Neste caso, não serão as rugosidades a provocar os microsulcos, mas sim partículas livres, que se movem livremente no contacto, e que possuem normalmente arestas mais agudas do que as rugosidades atrás referidas. A taxa de desgaste vai depender essencialmente do tamanho das partículas, sendo relativamente baixo para partículas de tamanho reduzido, mas aumentando significativamente à medida que o tamanho das partículas cresce. Verifica-se que a taxa de desgaste estabiliza quando o tamanho das partículas atinge um valor crítico. Nesta fase, dá-se a transição de um mecanismo de desgaste por corte para um mecanismo de deslizamento normal.

No caso das partículas serem macias, e com fraca resistência ao corte, verificar-se-á um encravamento destas no contacto, com a respectiva transmissão da carga entre o corpo deslizante e o substrato do material revestido, impedindo o contacto directo entre os mesmos. Esta situação traduz-se numa redução do desgaste e do atrito entre as superfícies, como é descrito por Burnett & Rickerby (1987).

1.2.3.1.5 - Fractura do revestimento

Quando um corpo deslizante sujeito a uma forte carga se movimenta sobre um revestimento duro, cria esforços de tracção a montante, e de compressão e empilhamento de material a jusante. Esta situação pode conduzir a diferentes mecanismos de fractura. A relação entre a dureza do substrato e a geometria do contacto será determinante no mecanismo de fractura que vira a ocorrer no revestimento.

O uso de revestimento finos duros é, na maior parte dos casos, a solução mais favorável com vista a um incremento da resistência ao desgaste. Contudo, se o substrato não for suficientemente duro para suportar as cargas que lhe são impostas, terão lugar deformações elásticas ou plásticas no substrato, sob a zona de contacto. O aumento da pressão imposta ao revestimento, ou à interface entre o substrato e o revestimento, pode atingir valores superiores à tensão que o material pode suportar, originando o aparecimento de fissuras que, após propagação, poderão levar à fractura do revestimento.

Uma dureza elevada do substrato permitirá um acréscimo da carga suportada pelo revestimento sem que se verifiquem fracturas, devido a um aumento da resistência à deflecção. Com um substrato mais macio, ocorrerão fracturas no revestimento, tanto na área do contacto como nas áreas adjacentes.

1.2.3.1.6 - Fractura devida a rugosidades excessivas

No contacto entre um mecanismo deslizante duro sobre uma superfície provida de um revestimento duro, ambos com elevada rugosidade e ângulos dos picos bastante agudos, haverá tendência para que as rugosidades se interliguem, provocando um atrito elevado no início do trabalho do mecanismo deslizante. O desgaste inicial provocará a quebra dos picos das rugosidades, o que implica o alisamento das superfícies. A dureza e forma das partículas podem afectar consideràvelmente o desgaste durante o deslizamento contínuo.

1.2.3.1.7 - Delaminação

Uma das situações mais comuns será o deslizamento de um mecanismo duro e rugoso sobre uma superfície provida de um revestimento duro e rugoso, com picos providos de ângulos bastante agudos. Esta é uma situação típica em engenharia das superfícies. A acção de deslizamento começará por ter lugar no topo das rugosidades. Surgirá uma deformação plástica importante, pelo facto da tensão aplicada não estar a ser suportada por toda a superfície. Efectivamente, a tensão no contacto é suportado apenas pelos picos das rugosidades.

As altas pressões desenvolvidas nos picos das rugosidades irão dar origem a deslocações, empilhamentos de deslocações e núcleos de fractura, a apenas dez microns da superfície, conforme foi descrito por Suh (1973 a 1986) na teoria da delaminação, e citado por Holmberg e Matthews 1994. A deformação plástica da superfície é extremamente reduzida, originando assim a nucleação de um grande número de fracturas, mesmo antes de se poderem formar partículas de desgaste. Neste modelo, as partículas laminadas apresentam-se como flocos e podem ter centenas de microns de extensão (Sue & Troue,1990 e Yamada et al., 1990).

Partículas ou fragmentos de desgaste que possuam dimensões diminutas, isto é, de dimensões inferiores à rugosidade da superfície, são consideradas irrelevantes para o processo de desgaste, já que têm tendência a ficar alojadas nos vales das rugosidades, enquanto o deslizamento se vai efectuado no topo dos picos.

Um revestimento macio fino aplicado sobre um substrato duro pode ser usado para reduzir o fenómeno de delaminação, impedindo também a deformação plástica e a nucleação desse mesmo substrato. Se a espessura do revestimento for inferior ao valor mínimo crítico, podem ocorrer fenómenos de delaminação, dando lugar à formação de partículas de desgaste, que poderão por sua vez causar sulcos e posteriormente, deformação plástica.

1.2.3.1.8 - Desgaste abrasivo

Este desgaste é típico de um mecanismo duro e rugoso que desliza sobre uma superfície provida de um revestimento com as mesmas características, com partículas duras de dimensões superiores aos valores da rugosidade da superfície no contacto. As partículas terão um efeito abrasivo em ambas as superfícies e, como se tornam responsáveis pela transmissão de grande parte da carga aplicada, causam picos de tensão concentrados em ambas as superfícies, onde têm tendência a penetrar (Rickerby & Burnett,1987 e Sue & Troue,1990). Os altos picos de pressão podem ser a origem da nucleação de fracturas no revestimento.

1.2.3.2 - Modificações micromecânicas

Os fenómenos macromecânicos de desgaste que foram referidos têm origem em fenómenos micromecânicos. A integração de todos os mecanismos micromecânicos dá lugar aos mecanismos macromecânicos referidos anteriormente.

Os mecanismos tribológicos micromecânicos descrevem a pressão e tensão que se formam num nível de rugosidade/rugosidade, a formação de fracturas e a sua propagação e formação e libertação de partículas a partir das superfícies em contacto. As partículas libertadas poderão ter dimensões da ordem do micrometro ou mesmo nanometro.

Tensões de corte e fractura são os dois mecanismos que contribuem de forma acentuada para a formação do primeiro núcleo de fractura e para a sua propagação até que se verifique a libertação do material sob a forma de partícula, formando entretanto as respectivas cicatrizes nas superfícies atingidas pelo desgaste (Holmberg & Matthews, 1994). Os mecanismos tribológicos micromecânicos poderão ser estudados tendo por base o conceito de modo de velocidade de acomodação desenvolvido por Bertier et al.(1989), que traduz a forma como a interface suporta a diferença de velocidades entre as duas superfícies em contacto.

Num contacto entre uma superfície deslizante sobre uma outra superfície revestida, podemos considerar que a velocidade de acomodação pode ter lugar em sete zonas diferentes, e que são as seguintes:

- Zona 1: A face oposta
- Zona 2: A sua interface
- Zona 3: O material intermédio
- Zona 4: O micro-revestimento
- Zona 5: O revestimento
- Zona 6: A sua interface com o substrato
- Zona 7: O substrato

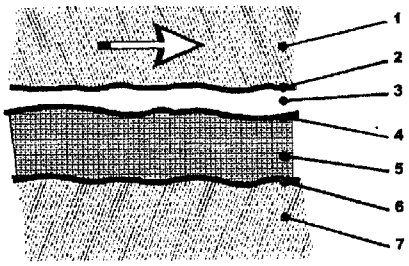


Figura 1.5 - Zonas que constituem o contacto entre uma superfície revestida e uma superfície não revestida (Holmberg e Matthews, 1994)

A velocidade de acomodação vai influenciar os mecanismos de desgaste e atrito, podendo originar a ocorrência de quatro fenómenos distintos: tensões de corte, fractura, deformação elástica e rolamento. A probabilidade de ocorrência destes mecanismos varia nas diferentes zonas da interface. A elasticidade e o rolamento estão principalmente relacionados com a fricção, e a sua influência torna-se menor quando consideramos o desgaste.

O quadro seguinte pretende, de uma forma esquemática, indicar a probabilidade de ocorrência dos quatro mecanismos indicados, em função de cada uma das zonas atrás consideradas, tendo em atenção a velocidade de acomodação.

	CORTE	FRACTURA	DEF. ELÁSTICA	ROLAMENTO
ZONA	Resistência ao Corte	Tenacidade	Módulo de Young	Resistência ao Rolamento
1	-	++	++	-
2	+	-	-	-
3	+++	+	+	+++
4	+++	+	+	+
5	+++	+++	+++	-
6	+	++	+	-
7	-	++	+++	-

LEGENDA : +++ = Muito Importante , ++ = Importante , + = Pouco Importante , - = Irrelevante

Quadro 1.1 - Probabilidade de ocorrência de corte, fractura elasticidade ou rolamento em cada uma das zonas do contacto (Holmberg e Matthews, 1994).

1.2.3.3 - Modificações triboquímicas

As reacções químicas que ocorrem durante um contacto de deslizamento alteram a composição e propriedades mecânicas das superfícies. Este facto pode ter uma influência considerável nas propriedades de resistência ao desgaste.

Na superfície, as reacções químicas são fortemente influenciadas por aumentos localizados de pressão e por picos de temperatura, que podem ocorrer em colisões de rugosidades e atingir os 1000°C.

As alterações provocadas nas superfícies dão lugar, geralmente, a dois tipos de fenómenos: a formação de um microfilme extremamente fino sobre o revestimento duro ou a oxidação no caso dos revestimentos macios.

1.2.3.3.1 - Formação de microfilmes nos revestimentos duros

Após ensaios efectuados por Makela e Valli (1985), considerando o deslizamento de uma superfície revestida a nitreto de titânio sobre outra provida do mesmo revestimento, foram registados coeficientes de atrito inferiores a $\mu = 0,1$. Ensaios idênticos efectuados por Miyoshi (1990), considerando uma superfície revestida a diamante deslizando sobre outra revestida a nitreto de silício, registaram valores de coeficiente de atrito de $\mu = 0,01$.

A explicação para resultados tão baixos do coeficiente de atrito está na formação de películas extremamente finas e de baixa resistência aos esforços de corte. A formação desta micropelícula terá lugar, principalmente, nos cumes das rugosidades.

Assim, teremos agora uma nova micropelícula macia a cobrir o revestimento. Se estudarmos o contacto numa microescala, podemos considerar que esta micropelícula se comporta como um revestimento macio que se formou sobre o revestimento duro, passando este último a funcionar como substrato duro.

A influência da formação de micropelículas na melhoria do coeficiente de atrito é considerável. Este assunto não está ainda amplamente estudado, tendo sido objecto de estudo por parte de Holmberg em 1992. Contudo, podemos considerar que a diminuição do atrito, que resulta da diminuição das pressões devidas a esforços de corte, tem uma influência favorável na resistência ao desgaste da superfície.

1.2.3.3.2 - Oxidação dos revestimentos macios

Em ambientes que contenham oxigénio, e em grande parte dos metais, existe a tendência para a formação muito rápida de uma fina camada óxida, com 1 a 10 nm de espessura. Enquanto algumas películas óxidas são facilmente removidas do metal, como o caso do óxido de cobre, outras dão origem à formação de películas mais duras, como é o caso do óxido de alumínio. A melhoria da lubricidade das superfícies por oxidação foi já observada por Sherbiney e Halling (1977) e Fayelle et al. (1990), segundo Holmberg e Matthews (1994).

Neste caso, mesmo que as partículas oxidantes de desgaste sejam duras, o efeito abrasivo não é necessariamente importante, devido às suas pequenas dimensões, comparada com a rugosidade das superfícies.

1.2.3.4 - Transferência de material

Os mecanismos micromecânicos e macromecânicos, assim como os mecanismos triboquímicos, explicam o fenómeno de controlo da resistência ao movimento. Como exemplo podemos considerar o atrito e a libertação de material da superfície, ou o desgaste e a produção de partículas de desgaste. Quando o material se liberta da superfície pode ainda influenciar o comportamento tribológico de duas formas distintas:

- detritos soltos no contacto influenciam o comportamento tribológico do contacto, em conformidade com os mecanismos já descritos ou
- os detritos juntam-se à superfície oposta do revestimento e formam uma película de transferência que altera consideràvelmente as propriedades tribológicas da superfície oposta.

Como consequência deste último ponto, poderemos considerar que é formada uma nova face oposta, constituída por um duplo material.

Foram registados fenómenos de uma considerável influência da transferência de películas no comportamento tribológico de contacto de superfícies revestidas a nitreto de titânio por Sue e Troue (1990), conforme foi referido por Holmberg e Matthews (1994).

1.2.4 - O estudo do comportamento das superfícies revestidas

O estudo do comportamento da superfícies revestidas efectua-se, ainda hoje, apenas pela via experimental. De facto, o elevado número de variáveis inerentes a um contacto entre superfícies revestidas e a falta de um conhecimento aprofundado da forma como todas essas variáveis estão relacionadas, têm sido as principais causas da inesistência de um modelo de cálculo que permitisse prevêr o comportamento tribológico dos contactos entre superfícies revestidas.

Efectivamente, é elevado o número de variáveis que condiciona o comportamento tribológico de qualquer contacto. No caso das superfícies revestidas, esse número de variáveis é ainda ampliado, pela introdução das variáveis inerentes ao processo de relação entre o revestimento e o substrato.

De uma forma sucinta são seguidamente apresentados os principais factores que condicionam os mecanismos de desgaste presentes num contacto entre superfícies revestidas:

- Coeficiente de atrito
- Rugosidade
- Dureza do substrato
- Carga
- Distribuição das tensões
- Uniformidade e tipo do contacto
- Velocidade
- Humidade ambiente
- Temperatura de trabalho
- Lubrificação
- Processo de realização do revestimento
- Material do revestimento
- Espessura do revestimento
- Dureza do revestimento
- Aderência do revestimento ao substrato

Com base nesta multiplicidade de factores, e na falta de modelos teóricos, foram criados diversos métodos de ensaio, devidamente normalizados, que permitem estudar o comportamento das superfícies revestidas, segundo vários tipos de contacto.

Os métodos de realização de ensaios será um assunto a desenvolver com mais pormenor no capítulo seguinte.

1.3 MÉTODOS DE PROTECÇÃO DAS SUPERFÍCIES

A protecção das superfícies tem sido objecto de preocupação por parte da industria e de estudo por parte da ciência, desde há muito tempo. Os fenómenos de corrosão e de desgaste das superfícies têm sido fortemente estudados ao longo dos anos, tendo surgido entretanto um leque extremamente variado de soluções, que passam invariavelmente por melhorar as características da superfície através de tratamentos ou deposição de revestimentos.

De uma forma genérica, podemos dividir os vários tipos de modificação das superfícies em três grupos principais:

- Tratamento com modificação localizada da estrutura cristalina
- Tratamento com modificação localizada da composição química
- Aplicação de revestimentos

A divisão nestes três grupos é discutível, já que é de certa forma usual fazerem-se tratamentos mistos, que englobam tratamentos de grupos diferentes. No entanto, a divisão nestes três grupos irá servir para fazer uma breve abordagem das técnicas utilizadas na protecção das superfícies, evidenciando os seus objectivos principais e as respectivas vantagens e desvantagens da sua aplicação.

1.3.1 Tratamentos com modificação localizada da estrutura cristalina

Os métodos que utilizam uma modificação localizada da estrutura cristalina, tais como os tratamento mecânicos, térmicos e termo-mecânicos, visam essencialmente melhorar as propriedades mecânicas do material como um todo. Nestes tipos de tratamentos, as superfícies adquirem propriedades que não diferem substancialmente das adquiridas pelo núcleo. Quando existe diferença entre as propriedades da superfície e as do núcleo verifica-se que a estrutura varia de uma forma gradual desde a superfície até ao núcleo, e tal facto fica a dever-se à forma como se verifica o escoamento da temperatura durante o tratamento, adquirindo o material estruturas diferentes em função da forma como se efectua o arrefecimento.

Os tratamentos com modificação localizada da estrutura cristalina apresentam uma enorme variedade de processos, tais como a granalhagem e o brunimento no campo dos tratamento mecânicos, ou o recozimento, têmpera e revenido, no campo dos tratamento térmicos.

Estes processos apresentam no entanto limitações, já que o factor temperatura poderá trazer implicações graves na distorção de forma em determinados casos. Por outro lado, a maquinagem de peças granalhadas poderá anular o efeito do tratamento, como consequência do aumento de temperatura verificada na superfície.

1.3.2 Tratamentos com modificação localizada da composição química

Os métodos que se baseiam na modificação localizada da composição, química recorrem a produtos químicos que, colocados em contacto com a superfície e activados por qualquer processo térmico ou eléctrico, reagem com esta, dando origem a uma zona que possui uma composição química diferente da inicial. As propriedades adquiridas pela superfície com este tratamento diferem das do núcleo, que mantém a composição química inicial.

Os métodos utilizados para modificar a composição química de uma forma localizada podem passar pelo endurecimento intersticial, tratamentos termo-químicos de difusão, tratamentos de conversão química, implantação iónica ou impregnação com abrasivos. Inseridos nestes tratamentos encontram-se a cementação, nitruração, nitruração iónica e carbo-nitruração,

bastante utilizados para aumentar a dureza e resistência ao desgaste das superfícies. Integram ainda este grupo os tratamentos de fosfatação e a anodização, que são frequentemente utilizados para melhorar as propriedades de resistência à corrosão, melhorando ainda a resistência ao desgaste e à corrosão de contacto.

Este tipo de tratamentos têm particular interesse quando se pretende proteger a superfície contra fenómenos de corrosão ou de desgaste, mantendo no núcleo características de base do material, que pretendemos conservar.

1.3.3 Aplicação de revestimentos

A aplicação de revestimentos consiste essencialmente na deposição de um material previamente seleccionado sobre um substrato. O material escolhido para o revestimento varia em função das características que se pretendem implementar na superfície e do material do substrato. A espessura do revestimento é função do tipo de material seleccionado para o revestimento, do trabalho de protecção que o revestimento vai desempenhar, e do método de deposição escolhido.

Os métodos de deposição actualmente disponíveis, alguns com recurso a tecnologias desenvolvidas recentemente, permitem a selecção do processo de revestimento mais adequado a cada necessidade. De uma forma esquemática, é apresentado seguidamente um quadro que sintetiza os diversos métodos de deposição.

MÉTODOS DE DEPOSIÇÃO	
Grupo	**Variantes**
Soldadura	Gás , arco eléctrico ou plasma
Projecção	Chama , arco eléctrico , plasma ou explosão
Placagem	Prensagem a quente de pó ou chapa
Imersão	Em metal fundido
Electrodeposição	Em solução aquosa ou em sais fundidos
Reacção química	Sem aplicação de corrente eléctrica
Em fase de vapor	Por via física ou química
Outros	Pintura , vernizes , ceras , etc.

Quadro 1.2 - Grupos de processos de deposição e suas variantes

A distinção entre revestimentos e tratamentos de conversão química torna-se por vezes complicada, já que muitos dos processos de revestimento criam uma zona em que se verifica interdifusão entre o substrato e o revestimento. De facto, para se conseguirem os melhores resultados na adesão do revestimento ao substrato, são incrementadas as reacções na

interface, aumentando os processos de interdifusão, de modo a que se crie um gradiente de composições e de propriedades entre o substrato e o revestimento.

Observando o quadro referente aos métodos de deposição atrás apresentado, poderemos dividir o conjunto desses processos em dois grupos de características distintas:

- Métodos tradicionais, constituído por processos como a soldadura, projecção, imersão, placagem, electrodeposição e outros.
- Métodos modernos, constituído essencialmente por processos de reacção química, ou em fase de vapor.

Com base nesta divisão, será feita de seguida uma breve abordagem dos processos incluídos em cada um destes grupos, e suas principais características.

1.3.3.1 - Métodos de revestimento tradicionais

Os métodos de revestimento tradicionais assentam essencialmente na utilização de quatro técnicas fundamentais:

- O aumento de temperatura dos materiais até à fusão
- A aplicação de carga, resultando numa pressão que é normalmente acompanhada de um aumento simultâneo da temperatura
- A projecção, utilizando para o efeito técnicas de pulverização assistida ou não por campos electrostáticos, plasma, explosão, chama ou arco eléctrico
- A electrodeposição, através da transferência de material entre um ânodo e o cátodo.

O método de revestimento por electrodeposição assume particular destaque dentro das técnicas tradicionais de revestimento, pela sua facilidade de execução e pelo custo, que é normalmente muito baixo. É utilizado principalmente para protecção anti-corrosiva, podendo também ser utilizado para efeitos decorativos. Nos casos da niquelagem e da cromagem dura, o revestimento poderá melhorar a resistência ao desgaste da superfície.

Este método apresenta como principais limitações a não linearidade espessura da camada depositada, que é maior junto ás arestas, e o facto de só poderem ser aplicados revestimentos condutores eléctricos sobre substratos que também sejam condutores eléctricos, já que o revestimento será utilizado inicialmente como ânodo e a peça como cátodo.

O método de projecção inclui um leque bastante alargado de soluções, que se estende desde a pintura até à pulverização de ligas micropulverizadas. No caso da pintura e do envernizamento, o efeito pretendido prende-se normalmente com a protecção das superfícies contra a corrosão ou para efeitos decorativos. No entanto, uma camada de verniz correctamente aplicada, de fraca espessura, pode suportar cargas elevadas e temperaturas de

trabalho até 400°C, proporcionando ainda um baixo coeficiente de atrito. Em ambos os casos, o revestimento é normalmente aplicado à pistola.

A projecção de ligas micropulverizadas utiliza normalmente plasma/arco eléctrico ou maçaricos modificados, que são os responsáveis pela fusão e posterior aceleração do material do revestimento, fazendo com que este seja projectado contra o substrato a grande velocidade. Podem ainda ser obtidos revestimentos com boas características de resistência ao desgaste utilizando a técnica de projecção por explosão, designada normalmente por "DGUN".

Os métodos de projecção apresentam uma óptima regularidade na espessura do revestimento, permitindo uma ampla gama de espessuras e uma execução rápida e precisa, sem necessidade de recurso a mão de obra muito especializada. A sua realização não se torna no entanto aconselhável a superfícies que possuam cavidades muito profundas ou furos cegos.

Os métodos que utilizam a pressão, combinada ou não com o aquecimento, dos quais poderemos considerar a placagem como um exemplo, consistem na adição de um dado revestimento a um substrato, podendo esse revestimento ser aplicado sob a forma de chapa contínua ou de pó. No caso da aplicação de chapa em contínuo, os processos utilizados são a co-laminagem ou a explosão. Quando a opção de revestimento recai sobre uma liga em pó, utilizam-se técnicas de sinterização.

O choque entre peças a rolar dentro de um tambor que contenha pó do material que vai ser aplicado como revestimento é ainda outra opção possível dentro dos processos que utilizam a pressão como meio de deposição. Esta técnica permite a aplicação de revestimentos com uma boa uniformidade, e espessuras entre os 5 e os 75 μm.

Os processos que utilizam o aumento da temperatura do material utilizado para revestimento até à sua fusão, para posterior aplicação, recorrem essencialmente a duas técnicas correntes: a soldadura e a imersão. No caso da soldadura, as camadas de revestimento depositadas apresentam espessuras e aspecto bastante irregulares, factos que conduzem a que a sua aplicação se restrinja a enchimentos. No caso da imersão, o material do revestimento é previamente fundido e mantido nesse estado num reservatório próprio, sendo a peça a revestir mergulhada no banho do metal que vai produzir o revestimento.

No caso da soldadura, existem limitações que se prendem com a temperatura desenvolvida e com os materiais possíveis de aplicar por este processo, sendo necessário ter em conta os inconvenientes já referidos no parágrafo anterior. Quanto ao processo de imersão, a principal limitação é imposta pela temperatura de fusão do revestimento. De facto, o material do revestimento tem de possuir uma temperatura de fusão relativamente baixa, de forma a que as peças a revestir possam ser mergulhadas no metal do revestimento fundido, sem que sofram distorções. Terá que existir uma diferença acentuada de temperaturas de fusão entre o material do substrato e o material do revestimento, de forma a que as peças a revestir mantenham a sua forma e características iniciais.

O processo de imersão apresenta ainda algumas limitações relativas à composição do substrato. Aços com alto teor em carbono e ricos em crómio tornam o revestimento de difícil

execução. Também os ferros fundidos com grafite livre necessitam de um pré-revestimento de níquel, ferro ou cobre antes de se proceder ao revestimento de estanhagem por imersão.

Em resumo, poderemos afirmar que os métodos tradicionais de revestimento utilizam técnicas com custos de investimento relativamente baixos. Os resultados obtidos são particularmente interessantes na área da protecção das superfícies contra a corrosão e fins decorativos. A protecção contra o desgaste pode ser significativamente melhorada, como no caso da cromagem dura, apresentando no entanto limitações relativamente às técnicas de deposição mais recentes. A uniformidade da camada nem sempre é perfeitamente assegurada, conforme foi já referido. A espessura da camada do revestimento pode variar entre os 5μm e vários milímetros, dependendo do processo utilizado e do resultado pretendido. A adesão do revestimento ao substrato vai depender do processo utilizado. No caso da aplicação de revestimentos por projecção, uma rugosidade moderada do substrato melhora a adesão do revestimento. Os revestimentos aplicados com recurso a técnicas tradicionais apresentam algumas limitações nas propriedades de resistência ao desgaste a quente.

1.3.3.2 - Métodos de revestimento modernos

Face aos resultados obtidos através da aplicação de revestimentos com os métodos tradicionais e à necessidade permanente de melhorar o comportamento das superfícies, foram desenvolvidas novas tecnologias que passaram a permitir a deposição de filmes mais finos, de materiais com melhores propriedades mecânicas, conduzindo a um forte incremento na resistência ao desgaste das superfícies, com particular destaque para a resistência ao desgaste a quente.

As técnicas de execução de revestimentos mais modernas recorrem à deposição em fase de vapor, podendo o processo ser dividido em três fases distintas:

- Geração da fase gasosa
- Transporte do material até ao substrato
- Formação do filme

O rápido desenvolvimento destas novas tecnologias de deposição em fase de vapor deu lugar ao aparecimento de diversas técnicas específicas de transporte do material do revestimento, desde o alvo até ao substrato.

Com vista a uma referência mais cómodo de cada uma das técnicas utilizadas, foram adoptadas siglas próprias para cada um dos processos. As técnicas de deposição em fase de vapor são normalmente designadas pelas siglas seguintes:

I I - Implantação iónica
IAC - Revestimento iónico assistido
IBAD - Deposição por feixe iónico assistido

CVD - Deposição química em fase de vapor
PVD - Deposição física em fase de vapor
PAPVD - Deposição física em fase de vapor assistida por plasma
PACVD - Deposição química em fase de vapor assistida por plasma

Na figura seguinte é apresentada a comparação relativa entre alguns dos métodos modernos e outros tradicionais, no que respeita à espessura do filme depositado e à temperatura de deposição.

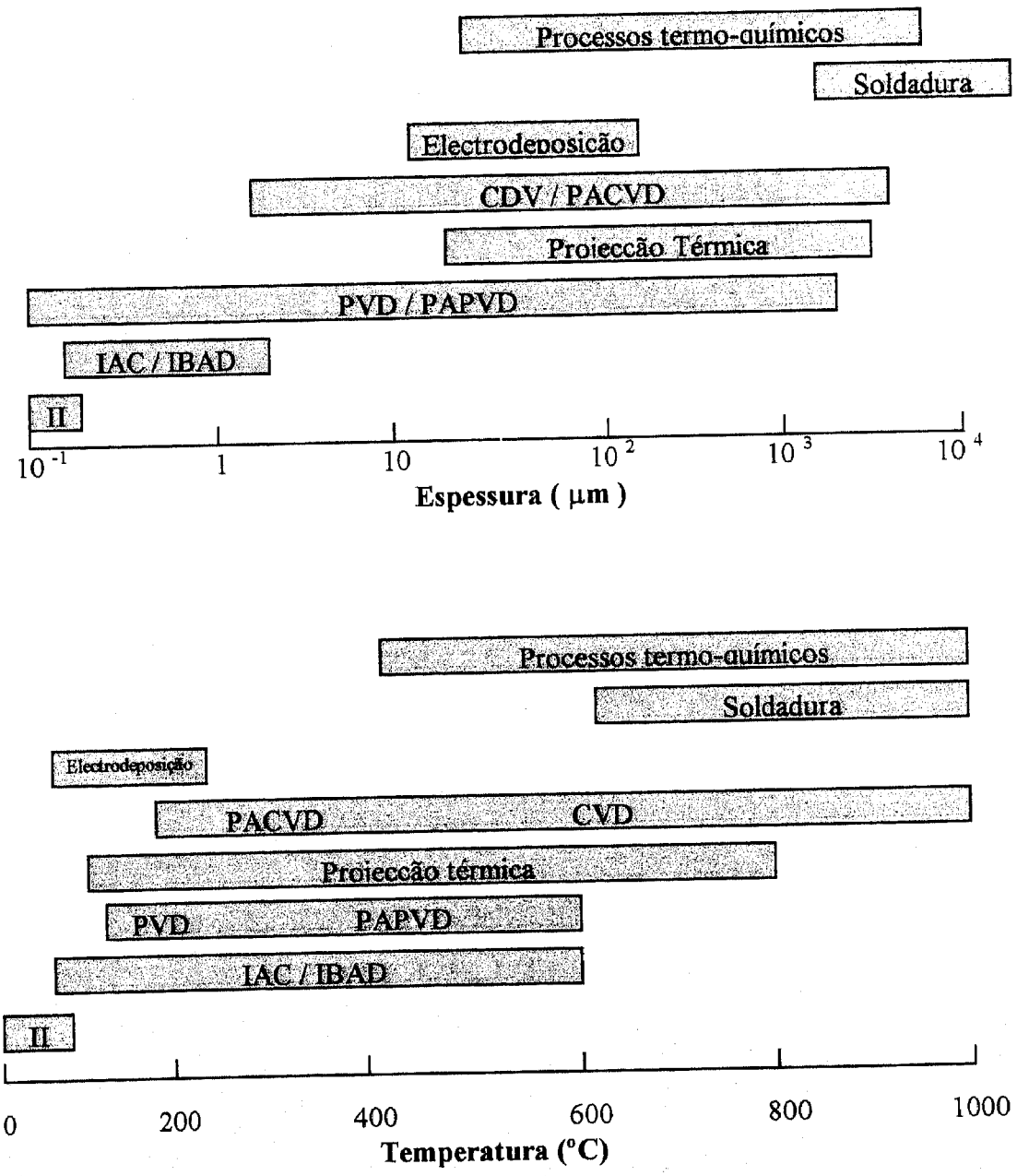


Figura 1.6 - Intervalos de variação da espessura do revestimento e temperatura de processamento para diferentes técnicas de revestimento.

As características dos métodos de deposição mais importantes encontram-se no quadro seguinte (Holmberg e Matthwes, 1994).

CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS (Resumo)

	Processos							
	Em fase de vapor					Solução	Por fusão	
	PVD	PAPVD	CVD	PACVD	II	Electrodepos.	Proj. Térm	Soldadura
Taxa de deposição(kg/h)	Até 0,5 por fonte	Até 0,2	Até 1	Até 0,5		0,1 - 0,5	0,1 - 10	3,0 - 50
Dimensões das peças	Limitado pelas dimensões da câmara					Limitado pela tina do banho	Limitado pelo tamanho da câmara	
Material do substrato	Grande variedade	Grande variedade	Lim. pela temp. de deposição	Algumas restrições	Algumas restrições	Algumas restrições	Grande variedade	A maior parte dos aços
Pré--tratamento	Mecânico/ químico + bombardeamento iónico	Mecânico/ químico + bombardeamento iónico	Mecânico/ químico	Mecânico/ químico + bombardeamento iónico	Químico + bombardeamento iónico	Limpeza química	Limpeza mecânica e química	Limpeza mecânica e química
Pós-tratamento	Nenhum	Nenhum		Nenhum	Nenhum	Nenhum ou trat. térmico	Nenhum	Nenhum
Controlo de espessura	Bom	Bom	Razoável/ Bom	Razoável/ Bom	Bom	Razoável/ Bom	Boa, se automatizada	Fraco
Uniformidade da espessura	Boa	Boa	Muito boa	Boa	Boa	Razoável/ Boa	Variável	Variável
Mecanismo de ligação	Atómico	Atómico + difusão	Atómico	Atómico + difusão	Atómico	Forças de superfície	Mecânico/ químico	Metalúrgico
Distorção do substrato	Baixa	Baixa	Pode ser grande	Baixa/ moderada	Baixa	Baixa	Baixa/ moderada	Pode ser grande

Quadro 1.3 - Resumo comparativo das propriedades dos processos de deposição modernos e de alguns processos tradicionais (Holmberg e Matthwes, 1994)

Genericamente, podemos afirmar que os processos de deposição modernos se dividem em dois grupos principais: o CVD, deposição química em fase de vapor e o PVD, deposição física em fase de vapor.

O processo de deposição química em fase de vapor utiliza reagentes gasosos como meio de transporte do material utilizado como revestimento, enquanto na deposição física em fase de vapor se procede à evaporação ou atomização do material do revestimento, dentro de uma câmara própria.

Conforme se pode compreender através da análise do quadro anterior, os métodos de revestimento em fase de vapor possuem um interesse considerável por variadas razões, entre as quais cumpre destacar a possibilidade de permitirem a aplicação de filmes ultra-finos de cerâmica pura, que possuem uma grande resistência ao desgaste a quente. No caso dos revestimentos efectuados por PVD, torna-se necessário incrementar a energia do material que

vai ser depositado, o que é conseguido normalmente por ionização e aceleração iónica até à superfície do substrato. A ionização e aceleração iónica são produzidas com recurso a uma fonte de bombardeamento iónico ou então criando plasma até ao substrato, o que vai permitir a aceleração dos iões até à superfície do substrato.

Os processos assistidos por plasma, principalmente no que diz respeito ao PVD, mas também em muitos casos de CVD assistido por plasma, apresentam as seguintes vantagens:

- Melhor capacidade de adesão do revestimento, devido à possibilidade oferecida pelo processo de limpar e pré-aquecer o substrato, por bombardeamento neutro de iões sobre o substrato. Este mecanismo é designado normalmente por limpeza catódica.
- Espessura uniforme do revestimento, através de efeitos de dispersão do gás,e da possibilidade de rodar e reposicionar as peças a revestir, de forma a que o vapor incida facilmente sobre todas as superfícies a revestir.
- Evita todas as operações de acabamento após revestimento, já que na maior parte dos casos a superfície revestida apresenta as características próprias de uma superfície acabada.
- Controlo da estrutura do revestimento, devido ao efeito produzido pelo bombardeamento iónico, que permite um desenvolvimento colunar e facilita o alojamento de novos átomos.
- Permite a utilização de uma gama mais diversificada de materiais para o revestimento e permite a realização de deposições sobre uma gama mais vasta de substratos, incluindo mesmo materiais isolantes. Neste caso são normalmente utilizadas ondas de radio-frequência.
- Permite controlar as taxas de deposição, através da utilização de uma vasta gama de fontes de vapor, tais como: resistências aquecidas, feixes electrónicos, indução, ou ainda pulverização catódica.
- Não produz efluentes, e na maior parte dos casos não são utilizadas soluções químicas ou outros produtos ou sub-produtos tóxicos.
- Permite depósitos de alta pureza, através da utilização de vácuo controlado, e fontes de material de elevada pureza.
- Utiliza normalmente temperaturas relativamente baixas, principalmente no processo PVD, já que a elevada energia conseguida pelo material do revestimento torna desnecessário o pré-aquecimento do substrato.
- Evita os problemas de fragilidade causada pelo hidrogénio, que são frequentes em processos de revestimento como a galvanoplastia.

A flexibilidade dos processos de revestimento por PVD podem ser apreciados na figura 1.7, que mostra como a estrutura do revestimento pode variar em função da pressão da aplicação e da temperatura utilizada no processo (Thornton,1974). Estes efeitos serão tratados com mais detalhe no capítulo seguinte.

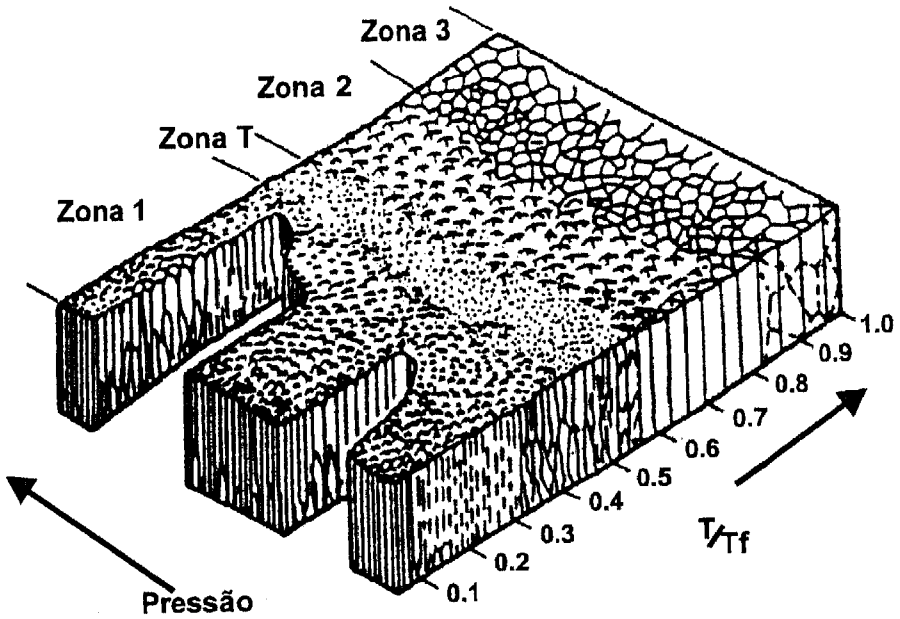


Figura 1.7 - Representação esquemática da influência da temperatura do substrato e da pressão do gás na microestrutura do metal do revestimento, tendo sido usado um processo de deposição por pulverização catódica. T/Tf representa a relação existente entre a temperatura do processo e a temperatura de fusão do material do revestimento.

1.3.3.2.1 - Processo CVD (Chemical Vapour Deposition)

No processo CVD, os gases que contêm os compostos voláteis do elemento ou elementos a depositar, são introduzidos numa câmara de reacção, e condensados no substrato, de modo a formarem o revestimento. Num processo típico de revestimento de ferramentas com nitreto de titânio ou carboneto de titânio, as peças a revestir são colocadas sobre prateleiras de grafite dentro de uma câmara aquecida, sendo seguidamente injectado o vapor portador do elemento ou elementos do revestimento. Após ocorrerem as reacções químicas próprias do processo, o vapor é aspirado do interior da câmara.

Em certos tipos de deposição, como por exemplo o revestimento tipo diamante, só são possíveis de efectuar através de processos tecnológicos e parâmetros muito particulares. Para fazer face às várias necessidades de revestimentos, têm sido desenvolvidas diversas variantes deste processo, à semelhança do que tem acontecido com o processo de PVD.

A pressão utilizada no processo CVD pode assumir valores que vão desde a pressão atmosférica até cerca de 1 Pa. Têm sido desenvolvidos vários métodos de melhorar o processo, através do uso de *laser*, feixes de electrões, ou ainda por bombardeamento iónico. Este último método possui a vantagem já anteriormente indicada para o PACVD, de permitir a realização do revestimento a temperaturas mais baixas. A utilização de uma temperatura mais baixa durante o processo de revestimento permite a obtenção de filmes mais densos e com melhor adesão.

Apesar de todos os desenvolvimentos técnicos efectuados até ao momento, continua a ser necessária uma selecção muito criteriosa dos parâmetros de revestimento, para que este seja efectuado com o êxito esperado. Factores como a orientação e tamanho do grão, ou ainda a composição e propriedades do revestimento, estão fortemente dependentes do conjunto de parâmetros seleccionados para o processo. A técnica de CVD pode ser usada para a aplicação de um vasto número de revestimentos resistentes ao desgaste, tais como: boretos, carbonetos, nitretos, óxidos, carbo-nitretos e óxi-nitretos da maior parte dos metais de transição (Sudarshan,1992). Revestimentos depositados por CVD para aplicações tribológicas, tais como o nitreto de titânio, possuem um grande angulo de limite do grão, e tamanho compreendido entre 0,5 e 5 μm.

Carlsson (1991) descreveu esquematicamente as zonas de reacção presentes num processo de CVD activado térmicamente, como mostra a figura 1.8.

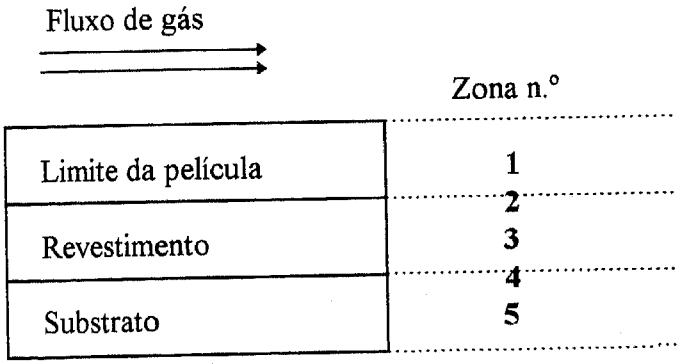


Figura 1.8 - Zonas de reacção no processo CVD (Holmberg e Matthwes, 1994)

Uma característica deste modelo é que o limite da película está identificado, e através dele são transportados os produtos reactores e reagentes. Tal facto implica um melhor controlo da taxa de deposição, enquanto que a reacção heterogénea na zona 2 normalmente define a microestrutura do revestimento.

A microestrutura depende essencialmente da temperatura de aplicação, a qual, para um nitreto de titânio é normalmente de 950°C. No entanto, num processo genérico de deposição por CVD, a temperatura pode variar desde a temperatura ambiente até 2500°C. A temperaturas mais elevadas, poderão ocorrer várias reacções no estado sólido nas zonas 3 e 5, tais como

transformações de fase, precipitação, recristalização e aumento do tamanho do grão. Na zona 4, a interdifusão entre o revestimento e o substrato pode levar à formação de fases intermédias. Estes efeitos são críticos para a adesão do revestimento ao substrato.

A necessidade de aplicação de temperaturas por vezes elevadas no processo de CVD tem sido a principal limitação do processo, e a principal causa do rápido desenvolvimento que processo PVD tem sofrido.

O processo de PVD, por ser o assunto nuclear deste trabalho, será tratado de forma particular no próximo capítulo.

1.4 O processo PVD

O processo PVD envolve a atomização ou vaporização da matéria a partir de uma fonte sólida, promovendo a transferencia desse material até ao substrato, onde se vai formar a película de revestimento.

Apesar do processo PVD básico ser conhecido há mais de 100 anos, e o PAPVD ter sido registado há mais de 50 anos (Berghaus, 1938), foi só a partir do final da década de 60 que começou a ter importância como método de revestimento tribológico. Isto deve-se ao facto de só recentemente o processo ter sido entendido como fundamental, tendo então sido introduzidas as modificações necessárias a um melhor desempenho do processo. Com a introdução destas alterações, foram conseguidas propriedades de extrema importância, tais como: excelente adesão, controlo estrutural, e aplicação de cerâmicos a baixas temperaturas.

Os processos de revestimento por PVD que se baseiam em trocas de energia mecânica, em que a deposição do revestimento é feita ao nível atómico em atmosferas de baixo vácuo, proporcionam a obtenção de películas com uma elevada pureza. O material do revestimento apresenta-se praticamente isento de defeitos do ponto de vista metalúrgico ou físico, apresentando propriedades bastante superiores às patenteadas pelo mesmo material depositado por processos convencionais. Os agregados cristalinos obtidos apresentam um tamanho de grão extremamente reduzido, isento de impurezas ou segregações nas juntas de grão, e com elevada densidade de deslocações, pelo que apresentam uma óptima resistência do ponto de vista metalúrgico (Tomé Ribeiro,1995).

Os métodos de projecção convencionais, utilizando um plasma ou no vácuo, apresentam graus de pureza bem mais restritos, e uma aderência 50 a 100 vezes inferior à obtida nos processos de deposição em fase de vapor.

1.4.1 - Métodos físicos de deposição em fase de vapor (PVD)

Além das vantagens anteriormente descritas, o processo físico de deposição em fase de vapor, apresenta ainda as seguintes vantagens:

- Possibilidade de deposição de compostos ligados
- Possibilidade de realização de revestimentos multi-camada
- Possibilidade de variação contínua das propriedades do revestimento, desde o início até ao fim da película.

O desenvolvimento de processos que permitissem todas as vantagens atrás referidas, levou ao aparecimento de muitas e variadas soluções dentro deste mesmo processo, como está ilustrado na figura 1.9 e 1.10.

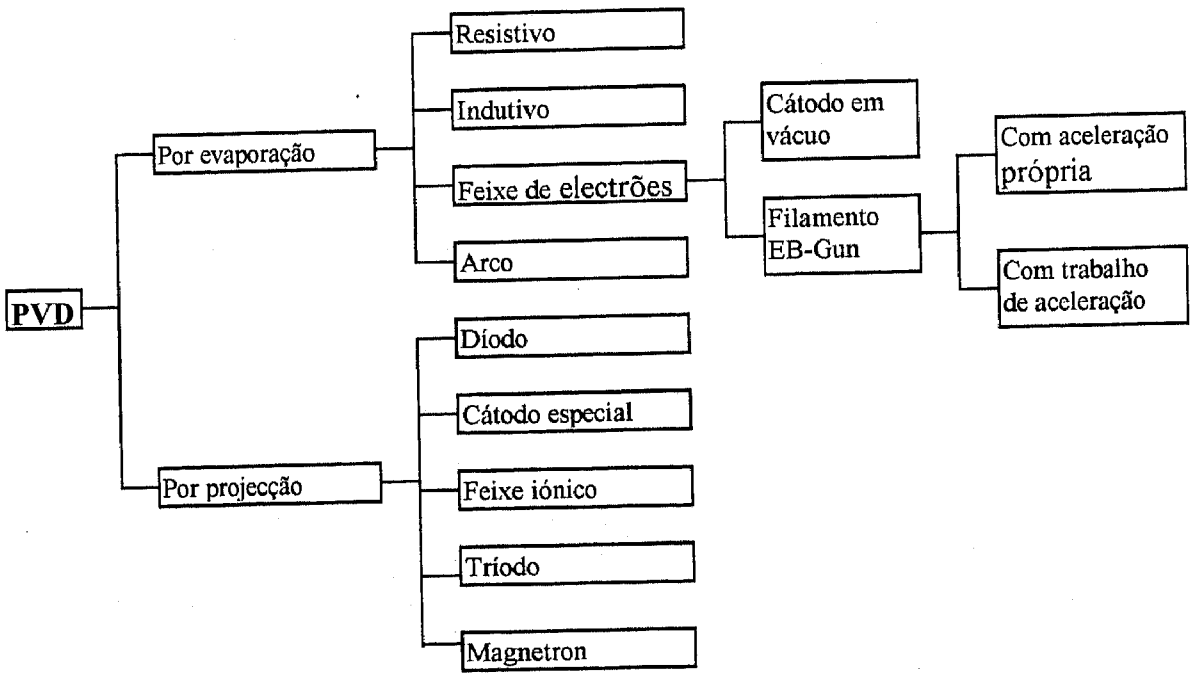


Figura 1.9 - Algumas das variantes do processo de revestimento físico em fase de vapor

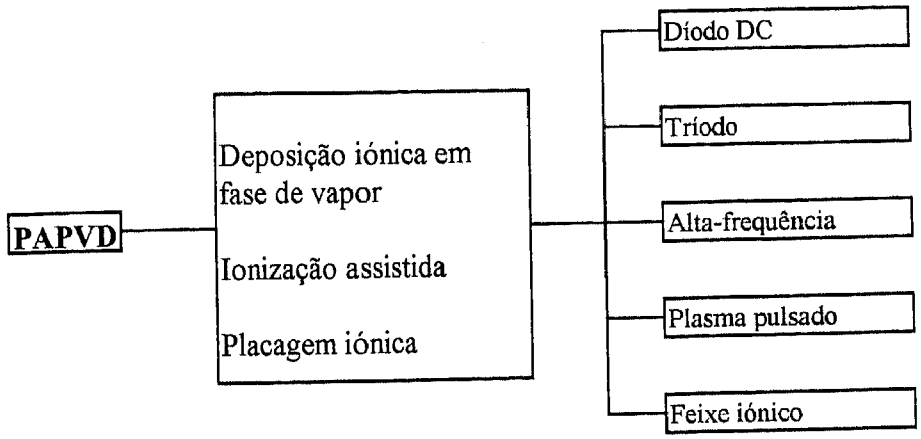


Figura 1.10 - Algumas das variantes do processo de revestimento físico em fase de vapor por plasma assistido.

As figuras anteriores referem apenas algumas das variantes actualmente existente. Estarão a ser desenvolvidas actualmente inúmeras técnicas relacionadas com a deposição tipo diamante, que ainda não se encontram referidas nas figuras 1.9 e 1.10.

Dos métodos atrás referidos, será dado particular destaque neste trabalho aos métodos de projecção catódica, normalmente designados por "sputtering", já que foi o método utilizado no revestimento dos provetes utilizados na realização deste trabalho.

1.4.2 O método "Sputtering" (Projecção catódica)

O método "sputtering", traduzido normalmente como projecção catódica, permite efectuar revestimentos extremamente finos, podendo utilizar uma enorme variedade de materiais como revestimento, a serem aplicados sobre uma variada gama de substratos. Como exemplos dos revestimentos que este método permite efectuar, podemos considerar os seguintes: metal em plástico, plástico em metal, plástico em papel, safira em plástico, cerâmica em metal, etc.

O método de projecção catódica proporciona as seguintes vantagens:

- Melhor adesão - A energia cinética conseguida pelos átomos e moléculas neste processo é várias vezes superior à energia proporcionada por outros métodos de deposição.

- Melhor estequiometria - A facilidade com que se conseguem produzir muitos compostos e a regularidade da sua composição, são factores pouco comuns a outros processos.

- Reprodutibilidade - A grande capacidade de controlo que este método possui, permite a repetição da execução de revestimentos ultra-finos com extrema precisão.

- Flexibilidade - A natureza do processo permite-lhe uma fácil adaptação, tanto a processos de produção de grande cadência, como a complexos estudos de aplicação.

O ímpeto dado ao estudo de várias técnicas de deposição resultou numa procura crescente deste tipo de solução, com recurso a um número crescente de materiais aplicados como revestimento. Nenhuma técnica de deposição permite uma aplicação universal, nem existe qualquer método que seja a solução para todos os problemas normalmente solucionados pela aplicação dos revestimentos. A projecção catódica, devido aos desenvolvimentos efectuados nos últimos anos, tornou-se uma técnica extremamente versátil de aplicação de revestimentos, que permite solucionar a maior parte dos casos de aplicação de películas ultra-finas.

O conceito de projecção catódica não é recente. O processo foi formulado por *Sir* William Robert Grove, em 1852, que se referiu ao processo que observou como "desintegração catódica". Mais tarde, em 1909, F. Stark deu a primeira explicação correcta do processo. Em 1921, *Sir* Joseph John Thompson baptizou o processo de "Spluttering", tendo o "l" sido retirado num relatório científico, dois anos mais tarde.

Inicialmente, o processo era apenas utilizado para aplicações decorativas. Em 1925, foram iniciadas investigações no campo das propriedades magnéticas proporcionadas por esta técnica. Em 1928, a Western Electric iniciou a utilização industrial deste processo no fabrico de gravações discográficas e contactos de microfones.

O primeiro processo de deposição catódica utilizava corrente contínua (DC - Direct Current). Apesar de representar o processo mais simples e mais prático, esta técnica apresentava a limitação de só poder ser aplicada a materiais metálicos. A descoberta e posterior desenvolvimento de corrente eléctrica de alta frequência, aplicada a este tipo de processos, nos últimos quinze anos, veio permitir a aplicação da deposição catódica a materiais não metálicos. As correntes eléctricas de alta frequência são normalmente designadas por radio-frequência (RF).

Proceder à projecção catódica de um qualquer material apartir de uma fonte, normalmente designada por alvo, sobre um substrato constituído por um outro material qualquer, passou a ser uma operação de fácil realização. A projecção do material desde o alvo é precedida de um bombardeamento da superfície do alvo por gás ionizado, acelerado por uma diferença de potencial estabelecida entre o ânodo e o cátodo. Partículas de dimensão atómica provenientes do alvo são projectadas sobre o substrato, como resultado da transferência cinética entre os iões incidentes e o alvo. As partículas projectadas do alvo atravessam a câmara de vácuo, e vão depositar-se no substrato, sob a forma de uma película extremamente fina.

O processo de libertação das partículas do alvo tem origem num mecanismo idêntico ao processo de transferência de energia entre as bolas de um bilhar. O ião de gás, que bombardeia o alvo com uma força enorme fornecida pela diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo, pode ser comparado à bola de saída de um bilhar. As partículas que constituem a superfície do alvo podem ser comparadas às bolas que vão ser batidas pela bola de saída. A figura seguinte pretende ilustrar a actuação do ião sobre a superfície do alvo.

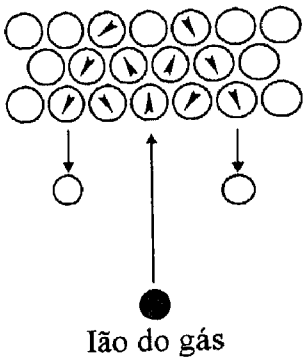


Figura 1.11 - Processo de bombardeamento de iões sobre o alvo, e consequente reacção (Material Research Corporation).

Como resultado do processo de bombardeamento iónico da superfície do alvo, e consequente reacção deste, geram-se atritos que conduzem ao aumento da temperatura do alvo. Este aumento de temperatura é na maior parte dos casos indesejável, pelo que se torna necessário proceder ao arrefecimento dos alvos através de circulação de água, na superfície oposta do alvo.

Em textos referentes ao processo de deposição por projecção catódica, é comum encontrarem-se expressões tais como "região incandescente do plasma (plasma glow region)" e "região escura (dark space region)". Estas expressões pretendem referir o seguinte: quando o alvo, referido como o cátodo, é carregado negativamente, os electrões são lançados no gás, próximo do alvo. Sob a influência de uma diferença de potencial aplicada entre o ânodo e o cátodo, o electrão acelera em direcção ao ânodo retirando energia do campo eléctrico. À medida que o electrão viaja em direcção ao ânodo, este pode colidir com uma molécula gasosa, cedendo a esta parte da sua energia, e dando origem à formação de um ião e um electrão livre extra. O efeito cumulativo deste fenómeno é uma descarga incandescente auto-sustentada. A área onde a ionização vai ter lugar aquece e vai tornar-se incandescente. Este efeito pode normalmente ser observado através de janelas próprias contidas no corpo da máquina. O processo de incandescência é em tudo idêntico ao utilizado nos tubos de iluminação, com excepção do gás utilizado. Na projecção por deposição catódica é utilizado normalmente o Argon ou o Azoto, enquanto na iluminação é utilizado o Néon como gás a ser ionizado.

Na figura seguinte pretende-se ilustrar de forma esquemática como se posicionam os diversos elementos intervenientes no processo, fazendo referência às zonas escuras atrás mencionadas.

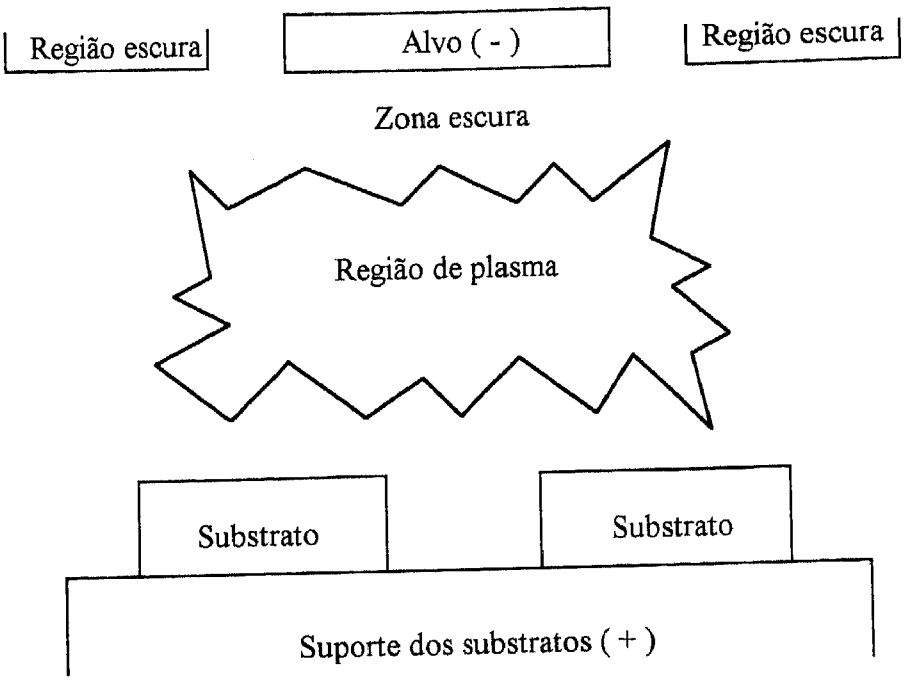


Figura 1.12 - Representação esquemática das diferentes regiões criadas dentro da câmara de deposição, e respectivo posicionamento (Material Research Corporation).

Existe uma área circundante do alvo em que se verifica não existir incandescência. Esta área é normalmente designada por "região escura", e corresponde ao local onde os electrões ainda não colidiram com a atmosfera gasosa, para se dividirem em iões e novos electrões livres. Quanto maior for a distância percorrida pelos electrões a partir do alvo, maiores serão as hipóteses destes colidirem e ionizarem as moléculas do gás. Conforme se poderá depreender, a zona frontal próxima do alvo, será uma zona de fraca ionização. Para incrementar os ganhos deste fenómeno, é colocado uma anel circundante ao alvo, de forma a que sejam evitadas possíveis perdas de material do alvo, devidas a fugas e dispersão laterais.

1.4.3 - Variantes do processo de deposição por projecção catódica

O processo básico de projecção catódica pode assumir diversas formas, podendo apresentar-se com configurações dos seguintes tipos:

- Polarização de corrente contínua
- Polarização de alta frequência
- Projecção catódica negativa
- Projecção catódica reactiva
- Projecção catódica por tríodo

- Projecção catódica por magnetron

A técnica de polarização por corrente contínua é utilizado na maior parte dos casos como processo de limpeza da película, para materiais condutores. Durante o processo de projecção catódica, e devido à elevada pressão exercida pelo gás, podem incorporar-se no revestimento quantidades substanciais desse mesmo gás. Para ajudar a eliminar esse gás incorporado na película do revestimento, é aplicada uma polarização negativa relativamente baixa ao substrato. À medida que a película se vai formando sobre o substrato, vai sendo levemente friccionada por iões que removem os átomos de gás preso no revestimento, sem perturbar a aderência da película ao substrato. Desta forma, são obtidas películas de maior densidade e com uma adesão ao substrato acrescida. A figura 1.13 ilustra a forma como estão dispostos os vários elementos dentro da câmara de deposição, e como é alimentado o sistema.

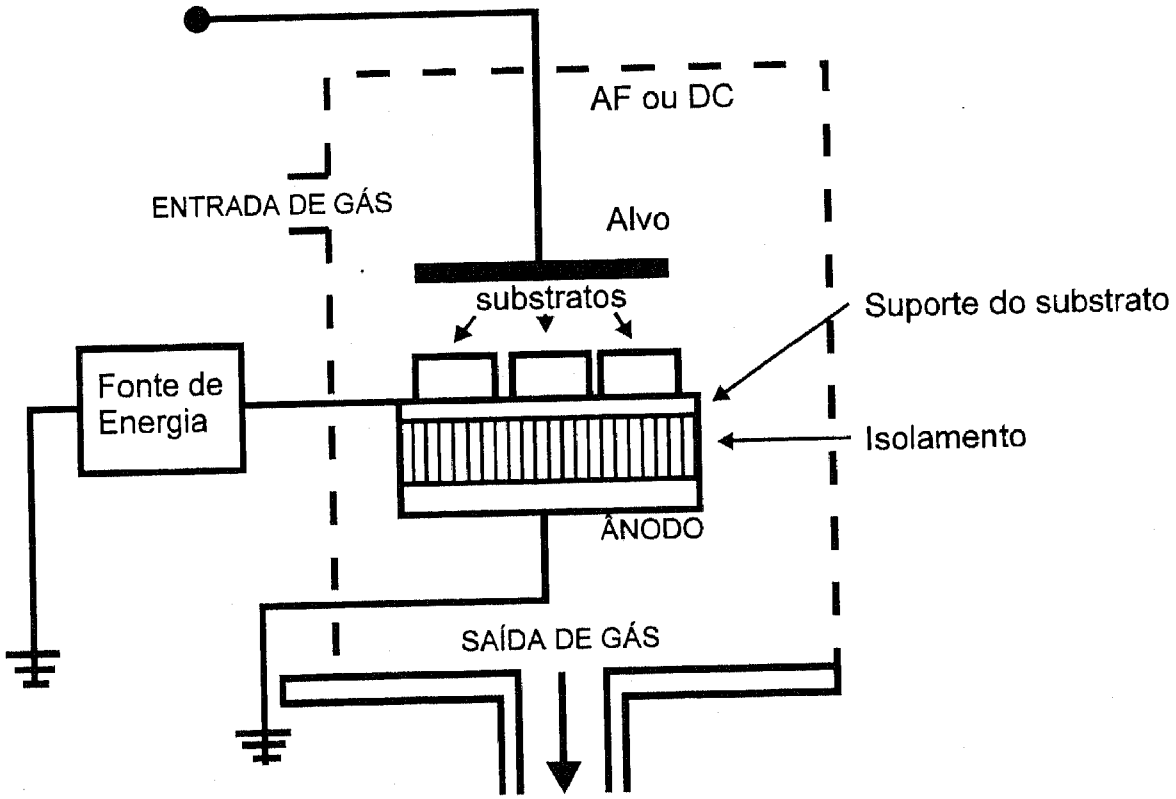


Figura 1.13 - Representação esquemática de um sistema de deposição catódica (Material Research Corporation).

A polarização por alta frequência é uma técnica similar à anteriormente descrita, que possui a particularidade de poder ser aplicada a revestimentos ou substratos não condutores. Esta técnica utiliza uma divisão do fornecimento de energia pelo substrato e pelo alvo, ao contrário da técnica de polarização por corrente contínua que utilizava fontes de energia diferentes. A

divisão da energia é feita de forma a que 90 a 95% desta seja fornecida ao alvo, sendo a restante fornecida ao substrato.

A projecção catódica negativa poderá considerar-se como uma contra-projecção, ou ainda uma projecção inversa. É uma técnica usada essencialmente para limpar e preparar substratos antes da aplicação do revestimento. Para tal, a energia de alta frequência é invertida, sendo o substrato carregado negativamente, e o ânodo toma o lugar do alvo. As impurezas que forem extraídas dos substratos são posteriormente recolhidas por uma placa metálica ou obturador, colocado junto ao topo da câmara. Efectuada a limpeza, o obturador abre-se, o fluxo de energia é invertido e a deposição pode efectuar-se sem que seja necessário abrir a câmara de vácuo. A combinação deste método de limpeza das superfícies, aliado à deposição por polarização de alta frequência, mostrou melhorar significativamente as propriedades das películas metálicas e particularmente daquelas que apresentam uma espessura extremamente fina.

A técnica anterior, auxiliada pela utilização de máscaras mecânicas ou foto-resistentes, permite a obtenção de recortes na película anteriormente depositada. Esta técnica possui particular interesse no fabrico de circuitos integrados e na aplicação de revestimentos decorativos.

A deposição por projecção catódica reactiva é executada apartir de um alvo quimicamente activo na presença de um gás, normalmente o oxigénio ou o azoto, com vista à obtenção de uma película composta de óxido ou nitreto. Com este processo é possível obter deposições de grande espessura a partir de um alvo metálico, com a vantagem deste mesmo alvo ser mais fácil de trabalhar, existir em maiores dimensões e ser mais económico do que os alvos utilizados na deposição de filmes muito finos. O controlo da composição a ser aplicada no revestimento é também mais eficaz neste processo, que pode recorrer a fontes de corrente contínua ou a fontes de alta frequência como meio energético de deposição. É no entanto aconselhado o uso da alta frequência como fonte energética do processo já que esta possui a vantagem de repelir a camada isolante que tem tendência a formar-se na superfície do alvo, devida a reacções químicas.

O sistema de tríodos tem adquirido um mercado próprio, estando particularmente vocacionado para aplicações específicas, onde se torna necessário o uso de baixas diferenças de potencial, para que sejam evitados danos radioactivos. Este processo opera com pressões inferiores aos sistemas projecção catódica, conduzindo a uma menor incorporação de gás nas películas e a uma maior densidade do filme depositado.

O processo de deposição com recurso aos tríodos consiste essencialmente no seguinte: os electrões são emitidos pelo filamento quente são atraídos por um eléctrodo carregado positivamente. A colisão destes electrões com os átomos de gás cria ionização e plasma, que é independente da voltagem do alvo. Um potencial negativo aplicado ao alvo, de alta frequência ou de corrente contínua, atrairá os iões provocando a projecção.

O sistema de tríodos é bastante complexo, apresentando custos de aquisição e manutenção pouco atractivos.

O sistema de magnetron de forma plana, desenvolvido recentemente, utiliza um campo magnético que aumenta a eficiência da ionização do plasma nos ângulos certos do campo eléctrico. Este processo oferece uma taxa de deposição várias vezes superior aos métodos convencionais anteriormente descritos, possibilitando simultâneamente a redução do aquecimento dos substratos. O sistema utiliza como fonte energética a alta frequência para materiais não condutores e a corrente contínua para materiais condutores conforme é ilustrado na figura seguinte.

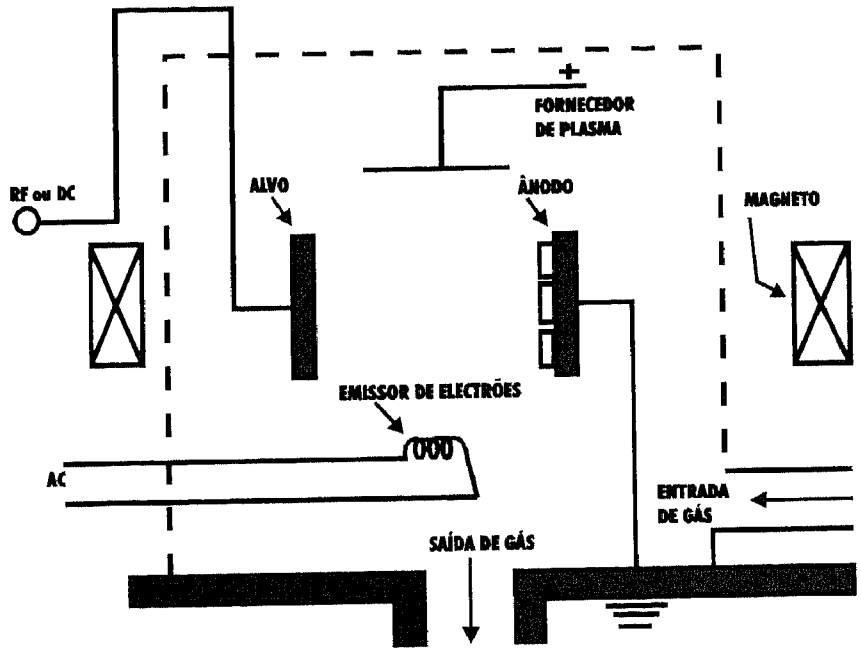


Figura 1.14 - Representação esquemática de um sistema de deposição catódica auxiliada por "magnetron" (Material Research Corporation).

O processo gera uma corrente ciclóide de electrões em frente da face do alvo, criada pelo campo magnético gerado. O material que é extraído do alvo sai essencialmente da área do anel correspondente à localização do campo magnético. Este facto condiciona o grau de utilização do material de todo o alvo, já que vai consumir o alvo de forma localizada, conforme está mostrado na figura 1.15. Para uma utilização mais racional dos alvos, foram entretanto criadas formas específicas de alvos, nomeadamente em forma de anel, o que veio a levantar problemas de uniformidade de espessura no filme depositado, obrigando a que fossem criados sistemas de rotação para os substratos.

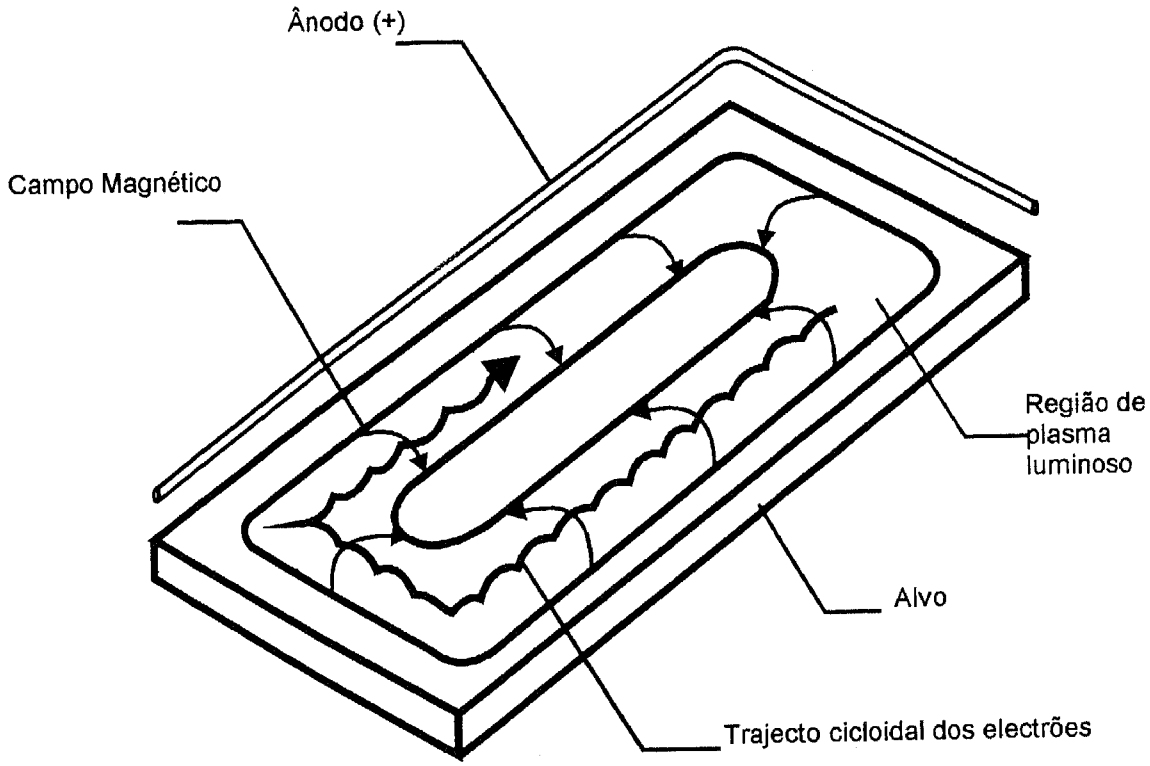


Figura 1.15 - Forma como o alvo vai ser consumido localizadamente

1.4.4 - Elementos fundamentais ao processo

A deposição de materiais em fase de vapor, conforme foi já exposto, necessita de meios específicos para a sua realização. A transferência de material é realizada dentro de uma câmara apropriada à qual, no caso concreto dos métodos de projecção, está associado um sistema de bombagem de ar que permite a obtenção do vácuo, estabelecendo uma pressão apropriada para a movimentação de pequenas partículas ionizadas dentro da câmara.

Para que um sistema de deposição física em fase de vapor,utilizando o método de projecção, seja operacional, torna-se necessário a verificação das seguintes condições:

- Mudança rápida de alvos e de substratos
- Controlo independente do maior número de variáveis que afectam o sistema de deposição
- Taxa de deposição atraente
- Boa adesão e integridade da película depositada

Seguidamente, e de uma forma sucinta, é feita uma referência às características principais que os diversos componentes do sistema devem possuir, de forma a que sejam assegurados os melhores resultados no processo de deposição por projecção catódica.

1.4.4.1 Câmara de deposição

Basicamente, a câmara de deposição é constituída pelos seguintes elementos:

- Topo da câmara
- Câmara de vácuo
- Suportes dos alvos
- Campos escuros
- Obturador do sistema de projecção
- Suporte dos substratos

O topo da câmara assegura a selagem da câmara de vácuo, servindo ainda como plataforma para a montagem do cátodo, água para a refrigeração dos alvos e conexões eléctricas. Quando é utilizada corrente de alta frequência, a rede de sintonização também é montada no topo da câmara. A câmara de vácuo é normalmente fabricada em aço e provida de janelas em vidro apropriado para que seja possível observar o processo de criação do plasma. O obturador do sistema de projecção tem por função impedir o escoamento do material do alvo para o substrato. O obturador permite ainda efectuar a limpeza do alvo, por remoção das impurezas microscópicas provocadas pelo seu manuseamento, através de uma operação designada por pré-"sputtering". O suporte dos substratos, por vezes, tem que ser concebido especificamente para um dado tipo de peças a revestir. Substratos tais como circuitos integrados, lâminas de barbear, ferramentas cirúrgicas, ou outras, implicam a construção de suportes adequados à forma específica da peça a revestir.

1.4.4.2 Sistema de vácuo

Os sistemas de vácuo podem assumir diversas configurações. A mais comum combina o uso de uma bomba de difusão com uma bomba mecânica. A bomba mecânica inicia o processo, através de uma bombagem grosseira, e em seguida a bomba de difusão de óleo permite a obtenção de um melhor nível de vácuo.

Um sistema algo diferente utiliza bombas turbo-moleculares, que na sua essência conseguem o vácuo usando turbinas de alta velocidade. Apesar do seu custo ser normalmente mais elevado, e do seu funcionamento ser menos fiável comparativamente ao das bombas de difusão, as bombas turbo-moleculares eliminam a possibilidade de derramamento de óleo, situação que a ocorrer, poderia contribuir para a contaminação das películas.

A maior parte dos sistemas usa Azoto líquido (Cryotap) entre a bomba de alto vácuo e a câmara de deposição, o que permite um aumento substancial da velocidade de bombagem do vapor de água e de outros gases condensados. Adicionalmente, protege os sistemas de bombagem da contaminação originadas por fugas. Apesar da deposição ser efectuada a um nível de vácuo relativamente baixo, é importante que o sistema seja projectado e construído de forma a que possam ser atingidos níveis de vácuo muito superiores.

Assim que a câmara é evacuada e levada ao nível de vácuo desejado, é introduzido no sistema o gás inerte, através de uma válvula de escoamento micrométricamente controlada. Os gases mais frequentemente utilizados são o Argon e o Azoto.

Para a deposição de películas de titânio, por exemplo, em que se pretende uma película extremamente pura, pode ser necessário incrementar a purificação do gás quando este é introduzido na câmara. Isto pode ser alcançado fazendo passar o gás através de um filamento quente, que reagirá com as impurezas activas, tais como o oxigénio ou o vapor de água. Este processo designa-se normalmente por "*gettering*".

1.4.4.3 Fornecimento de energia

A energia fornecida aos sistemas de "sputtering" pode assumir duas formas distintas:

- Corrente Contínua (DC)
- Alta frequência (RF)

A selecção do tipo de energia a fornecer ao sistema depende essencialmente do tipo de deposição que se pretende efectuar e do material que vai ser depositado, ou seja, se este é ou não condutor eléctrico. Em qualquer dos casos, o propósito do fornecimento de energia ao sistema é o mesmo: gerar o plasma e induzir a projecção, criando uma superfície de carga negativa no alvo.

A corrente contínua é utilizada essencialmente nos casos em que, quer o material dos substratos quer o material dos alvos são condutores eléctricos.

A alta frequência, também designada normalmente por radio-frequência, não impõe como condição o facto de alvos e substratos serem condutores eléctricos, pelo que é normalmente utilizada para deposições em/de materiais não condutores eléctricos.

1.4.4.4 Alvo

O alvo é o responsável pelo fornecimento do material que vai formar a película de revestimento sobre o substrato. A forma e a construção do alvo podem variar, dependendo do material que vai ser aplicado, do tipo de equipamento, e do tamanho e forma do material do substrato. Na maior parte dos equipamentos, é possível a montagem de vários alvos, factor que torna possível a deposição de ligas apartir de alvos de materiais diferentes, obtidas numa mesma operação de deposição e com composição estequiométrica bem definida. Na realização do revestimento de alguns dos provetes utilizados na realização deste trabalho, foram utilizados simultâneamente dois alvos de titânio e um de zircónio, sendo assim obtida a respectiva liga durante o processo de deposição.

A utilização dos alvos como fonte de material para a realização do revestimento reveste-se de enorme importância, já que factores como a pureza, densidade e homogeneidade do material que constitui o alvo e a forma como o arrefecimento e fixação destes é feita na câmara, são factores que condicionam fortemente as características finais do revestimento.

Também a técnica de fabrico do alvo se reveste de grande importância, pois condiciona a taxa de deposição e a velocidade de deslocamento das partículas que se movem do alvo para o substrato. No caso dos alvos de material metálico são mais comuns os métodos de fundição ou de pó metalúrgico. No caso dos cerâmicos, são utilizados em folha, quando o material assim permite. nos casos em que o material se torna mais difícil de modelar pelas técnicas convencionais, torna-se necessário o recurso a processos de fabrico por sinterização.
Apesar da falta de dados específicos sobre o assunto, é do consenso geral que o conteúdo gasoso do alvo assume extrema importância nas características finais do revestimento. A presença de gases nos metais considerados comercialmente puros, poderá acarretar as seguintes consequências:

- Alteração das propriedades electrónicas do material, pela presença de oxigénio, hidrogénio ou azoto.
- Diminuição da adesão, provocada pela presença de óxidos à superfície.
- Junção de outros metais à película aplicada (impurezas).

No caso dos alvos de materiais cerâmicos, normalmente produzidos apartir de pó, os cuidados utilizados na especificação da pureza devem ser ainda maiores. A consolidação dos pós e os materiais inertes normalmente utilizados neste processo de fabrico, podem levar à absorção de diversos contaminantes pelo pó, tais como dióxido de carbono ou vapor de água.

É recomendável que todos os alvos sejam arrefecidos durante o processo de deposição, como precaução contra variações de forma do alvo, alterações da microestrutura do material, alterações na taxa de deposição, ou ainda fusão do próprio alvo.

1.4.4.5 - Os substratos

Os substratos que se pretendem revestir apresentam-se na forma de peça acabada, pronta a receber a película de revestimento. Podem ser constituídos pelos mais diversos materiais, devendo sempre ser tomado particular cuidado com a limpeza adequada das superfícies, para que a adesão seja a mais conveniente.

A colocação das peças na câmara requer cuidados especiais, já que o fluxo iónico se faz mais intensamente segundo determinadas direcções.

1.4.4.6 Acessórios

Com vista à progressiva melhoria dos processos de deposição por projecção catódica, têm sido desenvolvidos diversos componentes e acessórios que, aplicados aos equipamentos anteriormente referidos, encurtam o tempo de preparação das diversas etapas do processo. Os principais esforços têm sido direccionados no sentido de minimizar o tempo necessário para atingir o nível de vácuo pretendido, e de minimizar as operações de limpeza entre operações de deposição. Tais esforços conduziram ao aparecimento de uma câmara lateral por onde são introduzidos os substratos, provida de uma bomba de vácuo mais rápida, eliminando assim o tempo que seria necessário para obter o nível de vácuo desejado na câmara maior, e evitando operações de limpeza entre diversas operações de revestimento efectuados num mesmo dia.

A introdução do desenho patenteado de torre rotativa eliminou também parte dos problemas criados pelo equipamento na execução de revestimentos multi-camada. A torre rotativa permite o uso de vários alvos e a obtenção de películas uniformes e repetidas, já que a simetria é mantida em todos os planos.

O grau de automação aplicado aos equipamentos tem crescido continuamente, possibilitando já a realização de revestimentos com necessidade da intervenção humana apenas para operações de carga e descarga de substratos. No entanto, a maior parte dos equipamentos possui um grau de automação médio, de forma a que os erros próprios da intervenção humana contínua sejam eliminados, e a repetibilidade dos resultados obtidos seja assegurada.

1.4.5 - Aplicações

As superfícies providas de revestimentos duros ultrafinos, ainda em pleno desenvolvimento, possuem já uma variedade enorme de aplicações. O desenvolvimento de técnicas que garantem uma maior produtividade e reprodutibilidade de resultados, e a divulgação de estudos que demonstrem as reais vantagens deste processo, permitem que novos projectos e

aperfeiçoamento de projectos anteriores contemplem a utilização das superfícies revestidas por PVD como solução para muitos dos problemas que anteriormente se levantavam.

A utilização do processo PVD como técnica de revestimento, encontra três campos genéricos de aplicação: a tribologia, a biomedicina e a decoração/óptica.

1.4.5.1 - Decoração e óptica

Neste campo, as aplicações são também imensas, e com tendência crescente. A bijuteria encontrou um óptimo substituto do ouro, com preços bastante mais atractivos. Os revestimentos não oxidam, e possuem uma coloração muito idêntica ao dourado do ouro. As vantagens anteriores, aliadas ao facto dos revestimentos apresentarem uma óptima resistência, tornam este processo bastante atractivo na acabamento de superfícies de peças utilizadas no fabrico de candeeiros, puxadores de portas e outros acessórios de uso doméstico.

Uma firma francesa (Michel Vilnat, 1994), produtora de revestimentos efectuados por PVD, é a responsável pelo revestimento dos logotipos da Renault ostentados pelos seus concessionários, os quais são fabricados em plástico, e revestidos por PVD de forma a adquirirem a cor cromada que apresentam. A mesma firma é ainda responsável pela decoração de garrafas de licor, utilizando o mesmo processo.

Os revestimentos efectuados por PVD são ainda utilizados como forma de bloqueio de raios infravermelhos, em objectos transparentes. São ainda utilizados em caixas plásticas usadas em componentes automóveis ou em informática, nas quais se pretenda proceder a uma protecção electrostática.

Uma das aplicações mais recentes está directamente ligada à produção dos compact-disc. A enorme produção deste artigo, que atingiu os 8,15 milhões de unidades fabricadas durante o ano de 1992 em França, utiliza a deposição de 5 camadas de revestimento para reflexo dos raios "laser" durante o processo de leitura.

1.4.5.2 - Biomedicina

A biomedicina tem sido uma área que tem aproveitado da melhor forma as vantagens oferecidas pelos revestimentos efectuados por PVD. A biocompatibilidade oferecida por grande parte dos revestimentos aliada ao facto de possuírem uma óptima resistência aos fluídos segregados pelo corpo humano, tem estado na origem da sua aplicação em válvulas montadas em artérias sanguíneas e em juntas de cartilagens (Holmberg e Matthews,1994).

As próteses dentárias são também um campo de forte aplicação dos revestimentos efectuados por PVD (Hans Halling,1995). O fabrico da prótese no material normal, seguido de um revestimento, melhora significativamente a vida e eficácia da prótese, melhorando também o seu aspecto.

1.4.5.3 - Tribologia

As aplicações com vista à melhoria do comportamento tribológico de inúmeros componentes mecânicos tem sido, sem dúvida, o maior campo de aplicação do processo PVD. a elevada dureza da película de revestimento, aliada à forte adesão deste ao substrato, melhora significativamente a resistência ao desgaste por abrasão. A baixa condutibilidade térmica do revestimento impede que se instalem tensões térmicas na superfície de peças fortemente solicitadas. O revestimento de nitretos provoca uma diminuição do atrito.

As vantagens apontadas, são as principais razões da utilização de revestimentos efectuados por PVD em ferramentas para maquinagem.

Este processo é ainda utilizado em punções e matrizes de ferramentas destinadas à conformação plástica. A indústria de moldes para plásticos e para fundição injectada recorre também a esta técnica para melhorar o comportamento dos seus produtos à abrasão.

Muitas das peças que compõem os teares são também sujeitas a forte abrasão, causada pela rápida passagem de fios. Também estes componentes têm visto o seu comportamento melhorado através da utilização de revestimentos efectuados por PVD.

Muitas outras aplicações, tais como lâminas de turbinas e componentes de bombas hidráulicas (Randhawa,1990), têm utilizado como revestimento os mais diversos tipos de nitretos para melhorar as suas performances em serviço, aumentando o período de tempo entre assistências, e diminuindo os riscos de falhas.

1.4.6 Avaliação e caracterização das superfícies revestidas por PVD

Nos capítulos precedentes foi dado destaque à forma como os revestimentos podem ser efectuados, quais as suas vantagens, e quais os mecanismos de desgaste a que podem estar sujeitos.

No entanto, após terminadas as operações de deposição do revestimento, torna-se necessário efectuar um determinado conjunto de operações com vista à avaliação e caracterização da película depositada. O conjunto de procedimentos adoptado deverá caracterizar a forma como

foi produzido o revestimento e quais as suas propriedades físicas, bem como avaliar o seu comportamento no contexto do serviço para o qual foi projectado.

Os procedimentos de caracterização e avaliação devem ser tanto mais rigorosos quanto mais recente é o processo de fabrico do revestimento ou o material utilizado no processo de deposição. O conjunto de procedimentos de ensaio estabelecido deverá ainda obedecer aos requisitos impostos pelas funções específicas que a superfície revestida vai desempenhar.

A importância de cada um dos parâmetros que caracterizam uma superfície revestida difere normalmente conforme o meio técnico ou científico que requer essa avaliação. Assim, os centros de investigação e desenvolvimento estabeleceram como prioritário analisar a seguinte lista de características, enumeradas por importância de forma decrescente (Holmberg e Matthews, 1994):

- Comportamento à fricção e ao desgaste
- Composição
- Adesão
- Resistência à corrosão
- Tensões Internas
- Acabamento superficial
- Morfologia
- Espessura
- Porosidade
- Tenacidade

Por seu turno, o meio industrial considerou mais importante analisar o seguinte lote de características, apresentadas por ordem decrescente de importância:

- Adesão
- Espessura
- Acabamento superficial
- Resistência à corrosão
- Comportamento ao atrito e ao desgaste
- Dureza
- Porosidade
- Composição
- Tensões internas e morfologia

1.4.6.1 Caracterização das superfícies

1.4.6.1.1 Rugosidade

A rugosidade das superfícies é normalmente avaliada com recurso a um rugosímetro. Estes fornecem normalmente um conjunto bastante completo de parâmetros, permitindo traçar o perfil da superfície e a curva de Abott-Firestone.

Do conjunto de parâmetros fornecidos pelo rugosímetro são normalmente seleccionados a Rugosidade Média Aritmética, Ra, a Profundidade Média da Rugosidade, Rz,e a curva de Abott, normalmente designada por curva da área de suporte.

No caso dos revestimentos ultra finos mais macios, e para evitar o contacto do apalpador do rugosímetro com a superfície revestida, foram desenvolvidas técnicas ópticas de interferometria, acompanhadas do respectivo suporte electrónico, que permitem a avaliação conveniente da superfície sem que se corram riscos de alteração das geometria da superfície por contacto com o apalpador do rugosímetro (Baushan e Gupta, 1991). Mais recentemente, têm sido desenvolvidas técnicas de exploração da superfície por microscópio confocal (Gee e McCormick, 1992), que permitem a obtenção de imagens tridimensionais da topografia da superfície.

1.4.6.1.2 Espessura

A espessura do revestimento assume particular importância no conjunto de factores que caracterizam a superfície, pois influencia o nível de tensões instaladas no revestimento e na sua interface, bem como a dureza da superfície e o grau de adesão do revestimento ao substrato.

A medição da espessura da película de revestimento, que é normalmente muito fina, pode ser efectuada com recurso a uma grande variedade de técnicas, conforme é referido por Holmberg e Matthews (1994):

- Métodos ópticos (Metalografia, SEM, Holografia)
- Métodos de remoção (Eléctrica, Transdutor de folgas)
- Métodos electromagnéticos (Fluxo magnético, Corrente de Eddy, Capacitância)
- Métodos de difusão (Ultra-sons, Retrodifusão Beta)
- Métodos de excitação (Raios X)

Os métodos mais frequentemente utilizados são aqueles que têm por base princípios electromagnéticos, magnéticos ou eléctricos, pois apresentam um custo inferior. No entanto, estes métodos não são os mais adequados para a medição de filmes ultra-finos. Para estes, são normalmente utilizados métodos ópticos de microscopia electrónica de varrimento (SEM), sendo no entanto necessário proceder à fractura do revestimento, de forma a que a sua espessura possa ser analisada de topo.

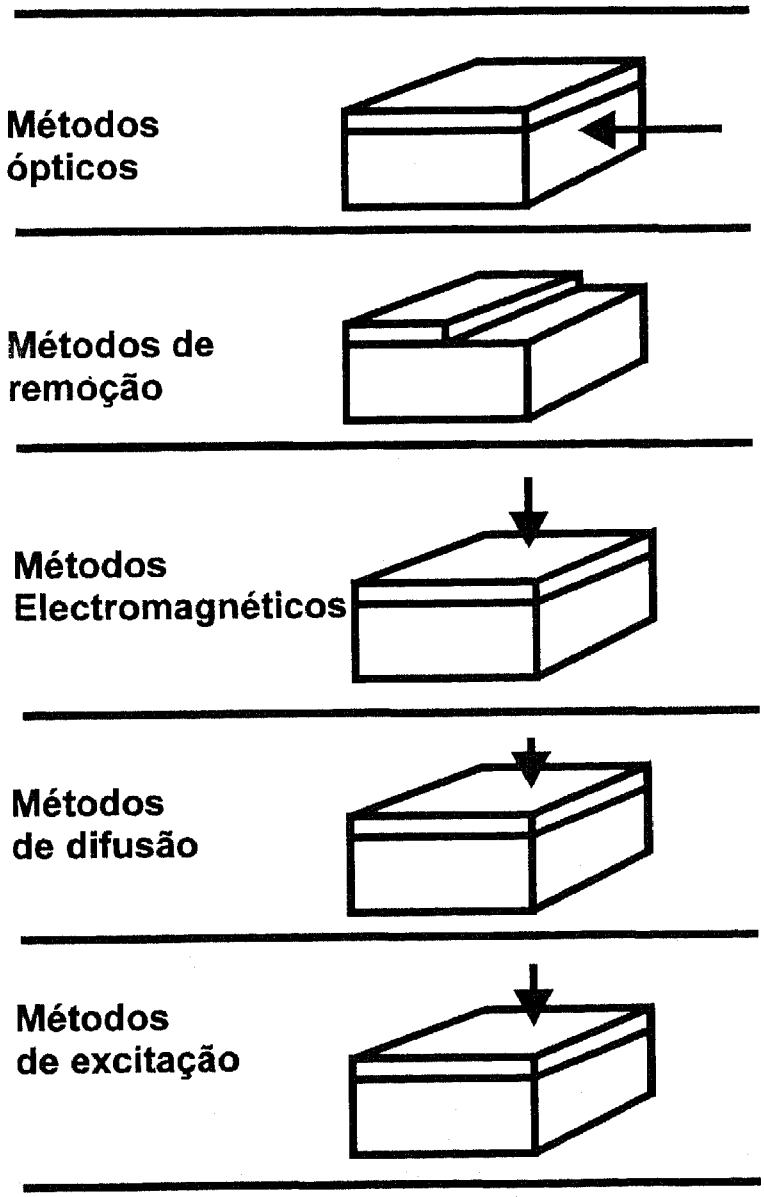


Figura 1.16 - Forma como é analisada a espessura do revestimento por cada um dos métodos indicados. (Holmberg e Matthwes, 1994)

1.4.6.2 Análise das propriedades mecânicas

1.4.6.2.1 - Dureza

A medição da dureza efectuada sobre películas normalmente muito finas, requer condições adequadas à sua realização.

Para a medição de dureza das superfícies revestidas são normalmente utilizados penetradores Vickers ou Knoop, com cargas de ensaio entre as 10 gramas e 500 gramas.

A forma de cada um dos penetradores atrás referidos é ilustrada na figura seguinte.

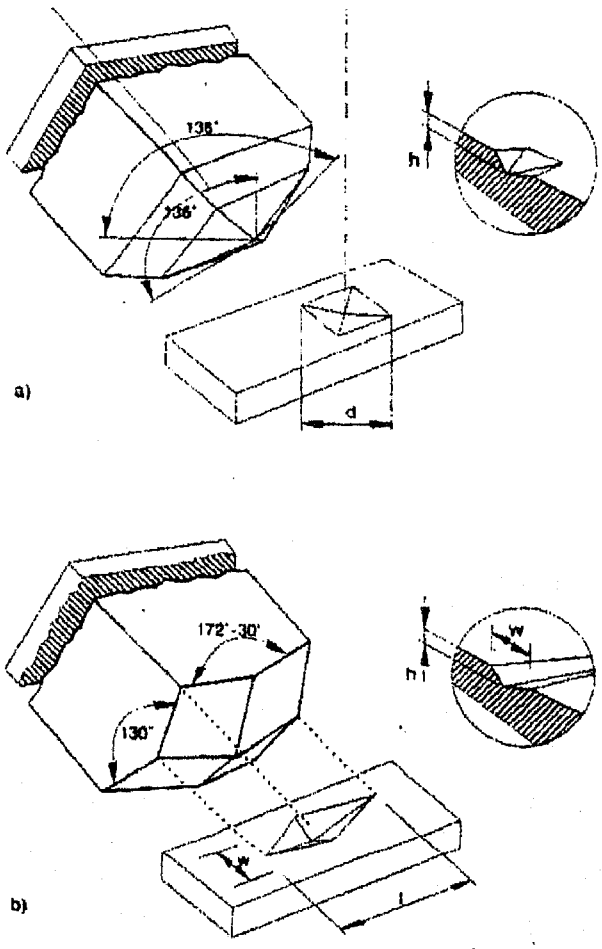


Figura 1.17 - Geometria do penetrador Vickers (a) e Knoop (b)

Foram já registados alguns erros na medição de microdurezas por Burnett e Rickerby (1987) e por Vingsbo (1986), que obtiveram valores de dureza superiores aos reais, quando decrescia a carga aplicada no ensaio. A explicação para tal facto foi atribuída à recuperação elástica registada pelo penetrador nessas condições de ensaio.

1.4.6.2.2 Adesão

A adesão assume particular importância na avaliação das propriedades de uma superfície revestida. Com efeito, uma fraca adesão do revestimento ao substrato altera de forma significativa o comportamento tribológico da superfície, invalidando todas as razões que poderiam ter estado na origem da realização do revestimento.

A adesão traduz a capacidade que o revestimento possui de se manter ligado ao substrato. Na prática, a adesão não pode ser tratada como uma mera energia de ligação atómica. Factores como defeitos presentes na estrutura ou tensões internas instaladas, poderão influenciar a adesão do revestimento ao substrato.

A adesão é caracterizada normalmente por dois tipos de ensaio bem específicos: os ensaios de esforço de tracção, também designados "pull-off tests", e os ensaios de deslizamento e raspagem, também designados por "scratch tests". Estes últimos registaram recentemente um forte desenvolvimento, graças ao facto de possibilitarem uma rápida análise qualitativa da adesão.

A representação esquemática do ensaio que submete o par revestimento/substrato a um esforço de tracção pode ser observada na figura 1.18. O processo recorre á colagem de uns corpos cilíndricos de aço ao revestimento, através de uma resina, sendo posteriormente efectuado um esforço de tracção segundo uma direcção perpendicular à interface substrato / revestimento, tendente a criar a separação entre estes nessa mesma interface.

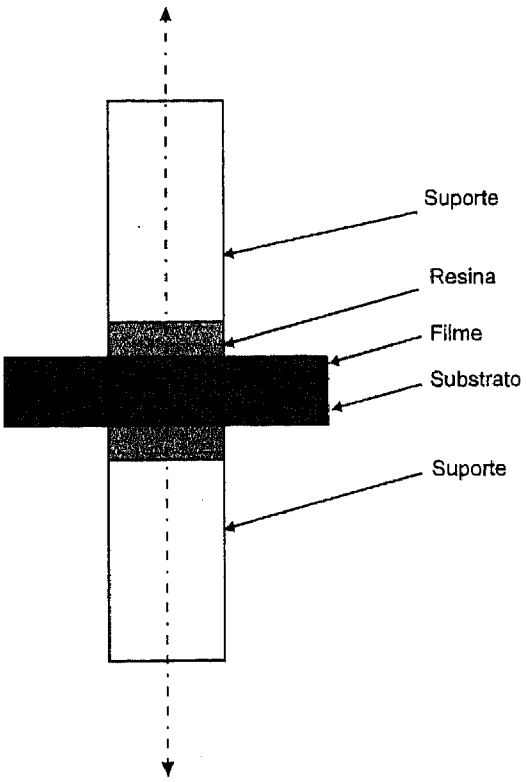


Figura 1.18 - Representação esquemática de um ensaio tipo "Pull-off"

Nos testes de deslizamento e raspagem ("Scratch-tests"), é utilizado um cunho de raspagem apropriado, em que a sua extremidade possui uma forma piramidal ou hemisférica. Esta extremidade é mantida em contacto com a superfície revestida, e sujeita a uma carga normal crescente, até que se verifique a desagregação do revestimento relativamente ao substrato. O ensaio é dado por concluído quando o revestimento fissura, ou se fragmenta à volta do cunho de raspagem, ou ainda se produz um canal em que todo o revestimento tenha sido removido.

Este é sem dúvida o método de análise de adesão que mereceu melhor acolhimento, quer por parte da comunidade científica, quer por parte dos meios industriais, devido às vantagens já anteriormente enunciadas. A figura 1.19 mostra de forma esquemática o princípio de funcionamento deste tipo de ensaio.

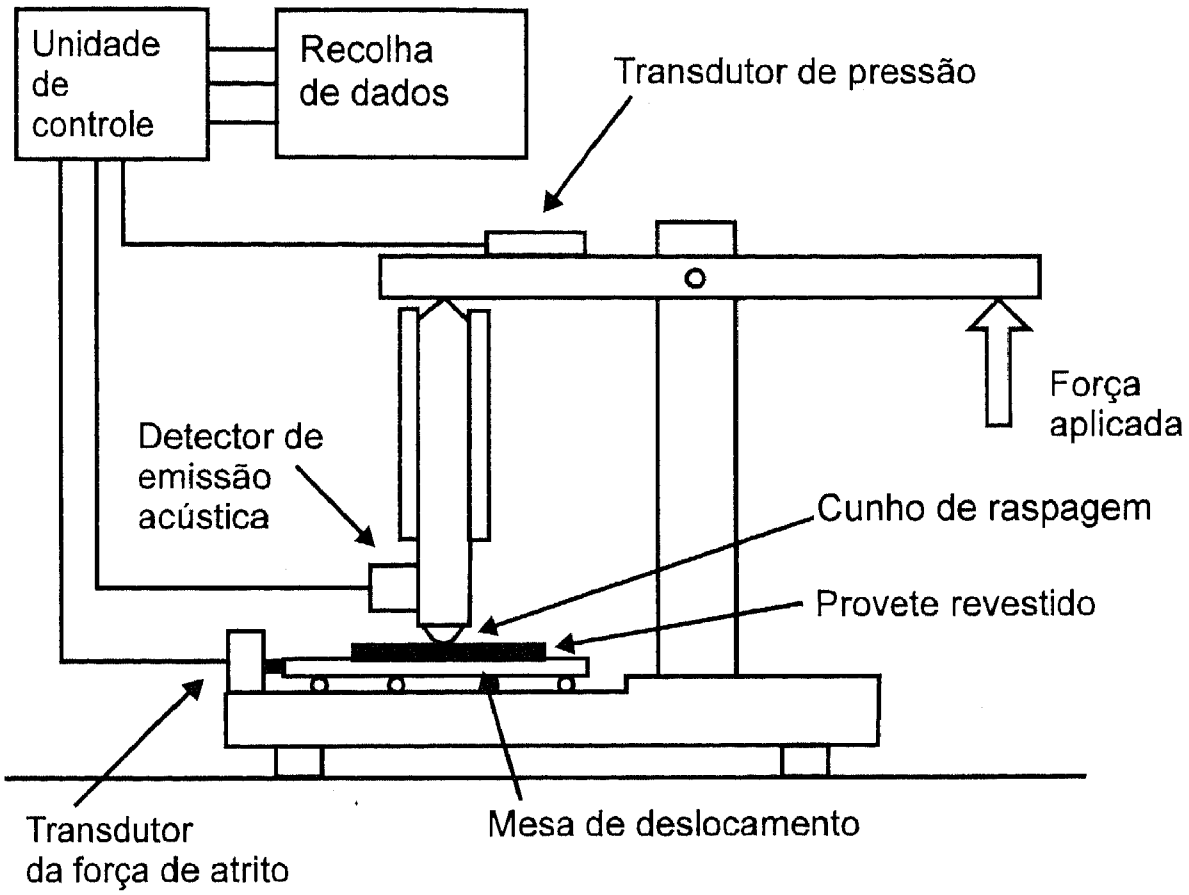


Figura 1.19 - Representação esquemática do princípio utilizado na realização de um "Scratch-test"

Deve no entanto referir-se que este método pode ver os seus resultados influenciados por factores como o tipo de material em que é fabricado o corpo de prova, pelo seu acabamento superficial, e pela sua geometria. Outros factores tais como a humidade do ar ou a geometria da superfície do revestimento podem também influenciar os resultados.

1.4.6.3 Estudo do comportamento tribológico

O estudo do comportamento tribológico das superfícies revestidas engloba uma grande variedade de ensaios. De facto, o elevado número de tipos de ensaio existentes, reflecte a diversidade de solicitações a que as peças revestidas podem estar sujeitas. Os diversos ensaio podem ser divididos em três grupos de testes diferentes, que são os seguintes:

- Testes de deslizamento
- Testes de abrasão

- Testes de rolamento

Dos três grupos indicados, e por estarem fora do âmbito do trabalho experimental desenvolvido, os testes de abrasão e rolamento não serão tratados em pormenor.

No caso dos testes de deslizamento, existem ainda diversas configurações diferentes, permitindo cada uma condições de ensaio distintas. Seguidamente são enumeradas algumas das configurações mais correntes neste tipo de ensaio:

- Pino em disco (Pin-on-disc)
- Patim em pista (Block-on-ring)
- Pino em plano (Pin-on-flat)
- Bloco em pino (Block-on-pin)

Das configurações apresentadas, a que tem recolhido maior preferência para o estudo do comportamento tribológico das superfícies revestidas é a primeira, isto é, a configuração pino em disco. No entanto, esta configuração apresenta algumas limitações de carga e velocidade de deslizamento pelo que, para condições de ensaio mais severas, é normalmente preferido o ensaio patim em pista. Na literatura consultada não foi encontrada qualquer referência a resultados obtidos usando qualquer uma das configurações restantes, estando estas no entanto devidamente normalizadas.

Seguidamente, serão apresentadas de forma resumida, as principais características correspondentes a cada uma das configurações atrás indicadas.

1.4.6.3.1 Configuração "pino em disco"

1.4.6.3.1.1 Configuração esquemática do ensaio

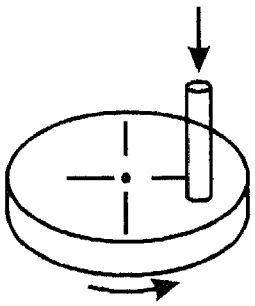


Figura 1.20 - Representação esquemática do ensaio de deslizamento tipo "pino em disco

1.4.6.3.1.2 Objectivos do ensaio

Este ensaio tem como objectivo a avaliação do desgaste e quantificação do coeficiente de atrito.

1.4.6.3.1.3 Provetes

Os provetes utilizados neste ensaio tem a forma de um pino, em que a sua extremidade possui uma geometria adequada, e um disco.

1.4.6.3.1.4 Condições típicas de ensaio

Nesta configuração, os valores típicos para a velocidade de deslizamento e carga normal são de 0,1 m/s e 10 N, respectivamente. O percurso de deslizamento efectuado por cada ensaio é normalmente de 1000 metros.

1.4.6.3.1.5 Parâmetros a avaliar

Os parâmetros avaliados neste tipo de configuração são:

- Massa perdida pelo pino
- Variação da geometria das superfícies em contacto
- Força de atrito

1.4.6.3.1.6 Aplicações e comentários

Esta configuração está indicada para situações de desgaste suave ou severo, em que a carga aplicada e a velocidade de deslizamento sejam reduzidas. É indicada para a avaliação do comportamento tribológico das superfícies revestidas.

1.4.6.3.2 Configuração "patim em pista"

1.4.6.3.2.1 Configuração esquemática do ensaio

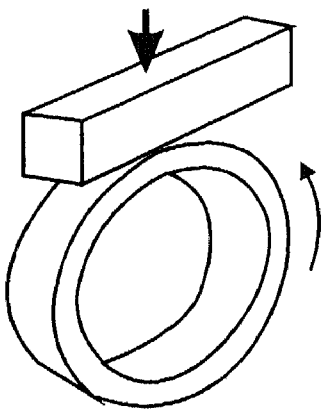


Figura 1.21 - Representação esquemática do ensaio "patim em pista"

1.4.6.3.2.2 Objectivos do ensaio

Esta configuração de ensaio tem como objectivos a quantificação do desgaste nas superfícies revestidas, quando sujeitas a condições de carga e velocidade bastante severas.

1.4.6.3.2.3 Provetes

Os provetes utilizados nesta configuração possuem o formato de um bloco com o mesmo raio de curvatura de um anel, estando o primeiro fixo e o segundo animado de um movimento de rotação. A carga é executada pelo patim (bloco) sobre a pista.

1.4.6.3.2.4 Condições típicas de ensaio

Neste tipo de configuração, a velocidade atingida pela pista pode chegar às 7.000 rotações por minuto, e a carga a 6.000 N. A duração do ensaio pode ir até aos 24.000 ciclos, podendo o ensaio ser efectuado sem lubrificação ou com os provetes imersos em óleo lubrificante.

1.4.6.3.2.5 Parâmetros a avaliar

Neste tipo de configuração, podem ser avaliados os seguintes parâmetros:

- Massa perdida pelo patim
- Massa perdida pela pista
- Força de atrito
- Capacidade de carga do filme lubrificante

1.4.6.3.2.6 Aplicações e comentários

Esta configuração está indicada para a avaliação de desgastes suaves ou violentos, sob condições de contacto muito severas. É ainda indicado para o estudo do desgaste em contactos lubrificados.

1.4.6.3.3 Configuração "pino em plano"

1.4.6.3.3.1 Configuração esquemática do ensaio

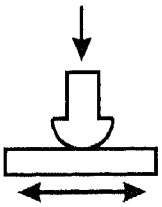


Figura 1.22 - Representação esquemática do ensaio tipo "pino em plano"

1.4.6.3.3.2 Objectivos do ensaio

Este tipo de ensaio tem como objectivo a quantificação do desgaste e coeficiente de atrito, em condições de carga e velocidade suaves, em pequenos provetes.

1.4.6.3.3.3 Provetes

Nesta configuração é utilizado um pino ou uma esfera e um plano.

1.4.6.3.3.4 Condições típicas de ensaio

A movimentação do plano que provoca o deslizamento é feita de forma cíclica, a uma frequência de 5 Hz, com uma distância de deslizamento de 10 mm. A carga efectuada pelo pino sobre o plano deve ser de 25 N. A temperatura e humidade do ar deverão estar situados entre os 18 e 23°C e 40 a 60% HR, respectivamente. O ensaio pode ser efectuado com o contacto seco, ou com os provetes totalmente imersos em óleo lubrificante.

1.4.6.3.3.5 Parâmetros a avaliar

Neste tipo de configuração, podem ser avaliados os seguintes parâmetros:

- Massa perdida pelo plano
- Massa perdida pelo pino
- Avaliação da cratera deixada pelo contacto de deslizamento
- Força de atrito

1.4.6.3.3.6 Aplicações e comentários

Esta configuração está indicada para desgastes por adesão suaves e estudo do comportamento tribológico de superfícies revestidas.

1.4.6.3.4 Configuração "Bloco em pino"

1.4.6.3.4.1 Configuração esquemática do ensaio

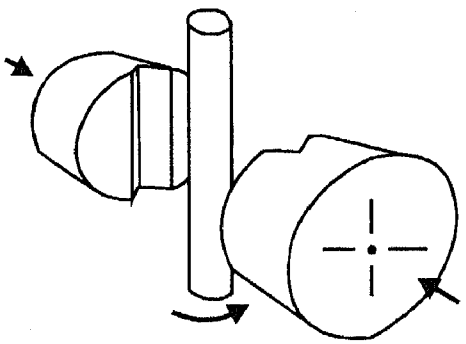


Figura 1.23 - Representação esquemática do ensaio tipo "Bloco em pino"

1.4.6.3.4.2 Objectivos do ensaio

A realização deste tipo de ensaio tem por objectivo quantificar o desgaste e determinar o coeficiente de atrito e a capacidade de carga de um contacto sujeito a deslizamento.

1.4.6.3.4.3 Provetes

Nesta configuração tornam-se necessários três provetes: um de forma cilíndrica, com um diâmetro de 6,35 mm, e dois blocos cilíndricos providos de uma ranhura em "V". Os blocos cilíndricos são pressionados contra o pino cilíndrico por uma determinada carga, que se vai distribuir por quatro linhas de contacto com o pino cilíndrico, que se encontra animado de um movimento de rotação.

1.4.6.3.4.4 Condições típicas de ensaio

O pino giratório roda normalmente a 290 rotações por minuto. A velocidade de deslizamento toma normalmente o valor de 0,1 m/s. A carga aplicada aos blocos pode ser fixa ou crescente e variar entre os 89 e os 20.000 N. A pressão de Hertz instalada deve situar-se entre os 242 e 3450 MN/m^2. Os provetes devem estar imersos em óleo ou outro fluído lubrificante.

1.4.6.3.4.5 Parâmetros a avaliar

Neste tipo de configuração podem ser avaliado os seguintes parâmetros:

- Binário do pino giratório
- Progressão do desgaste em profundidade
- Carga necessária para que ocorra gripagem
- Massa perdida pelos provetes

1.4.6.3.4.6 Aplicações e comentários

Esta configuração de ensaio adapta-se à avaliação de desgastes moderados ou severos, provocados por adesão, e à análise de deformações ("Scuffing").

1.4.6.3.5 Equipamentos laboratoriais de estudo do comportamento tribológico

A realização dos testes descritos nas secções anteriores requer a utilização de equipamento específico para o efeito. Nesta secção será feita uma breve abordagem sobre a configuração dos equipamentos normalmente utilizados para a realização de ensaios "pino em disco" e "patim em pista", visto serem estes os de uso mais corrente em laboratórios de tribologia.

1.4.6.3.5.1 Equipamento para realização de ensaios "pino em disco"

O equipamento destinado á realização de ensaios do tipo "pino em disco", está provido de um accionamento com regulação de velocidade, acoplado a um prato, que vai servir de suporte e ponto de fixação ao disco. O pino é montado num haste devidamente equilibrada, que possui um braço e um suporte, onde são colocadas as "massas" responsáveis pela aplicação da carga sobre o pino. A força efectuada pelo pino sobre o disco é controlada por uma célula de carga que, com o auxilio da instrumentação adequada, fornece uma informação contínua daquela grandeza.

A configuração esquemática deste tipo de equipamento está representada na figura 1.24.

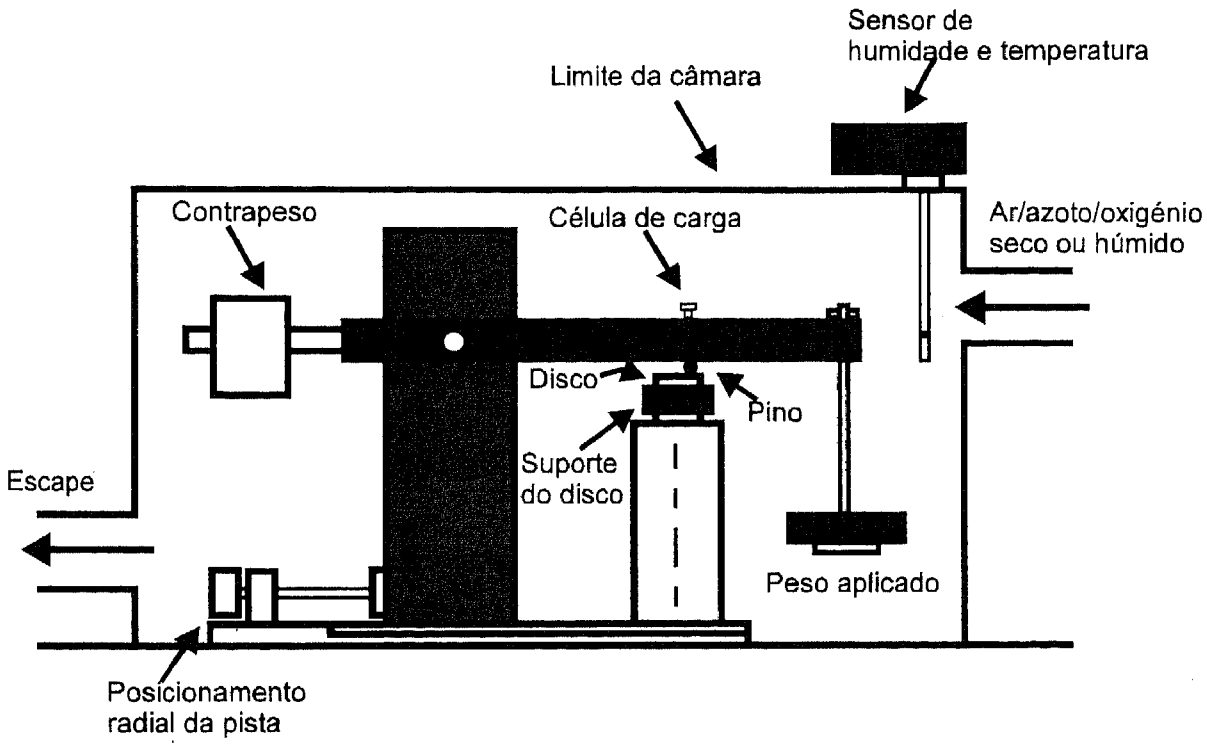


Figura 1.24 - Representação esquemática do equipamento de ensaio "pino em disco", provido de câmara de controlo de humidade e temperatura. (Holmberg e Matthwes, 1994)

Para que as condições atmosféricas na zona de teste possam ser mantidas dentro dos parâmetros estabelecidos na respectiva norma de ensaio, torna-se necessário possuir um controlo adequado sobre a temperatura e a humidade do ar nessa zona. Para que tal aconteça, o equipamento é montado dentro de uma câmara provida de aparelhos de controlo e condicionamento do ar.

1.4.6.3.5.2 Equipamento para a realização de ensaios "patim em pista"

Para a realização deste tipo de ensaio é utilizado um tribómetro rotativo, também designado de tribómetro de Blouet. Este equipamento permite o estudo do atrito e desgaste provocado pelo escorregamento entre dois corpos, a seco ou com lubrificação. Este tribómetro possibilita ainda a simulação de diversos modos de contacto. A figura 1.25 ilustra de forma esquemática este tipo de equipamento.

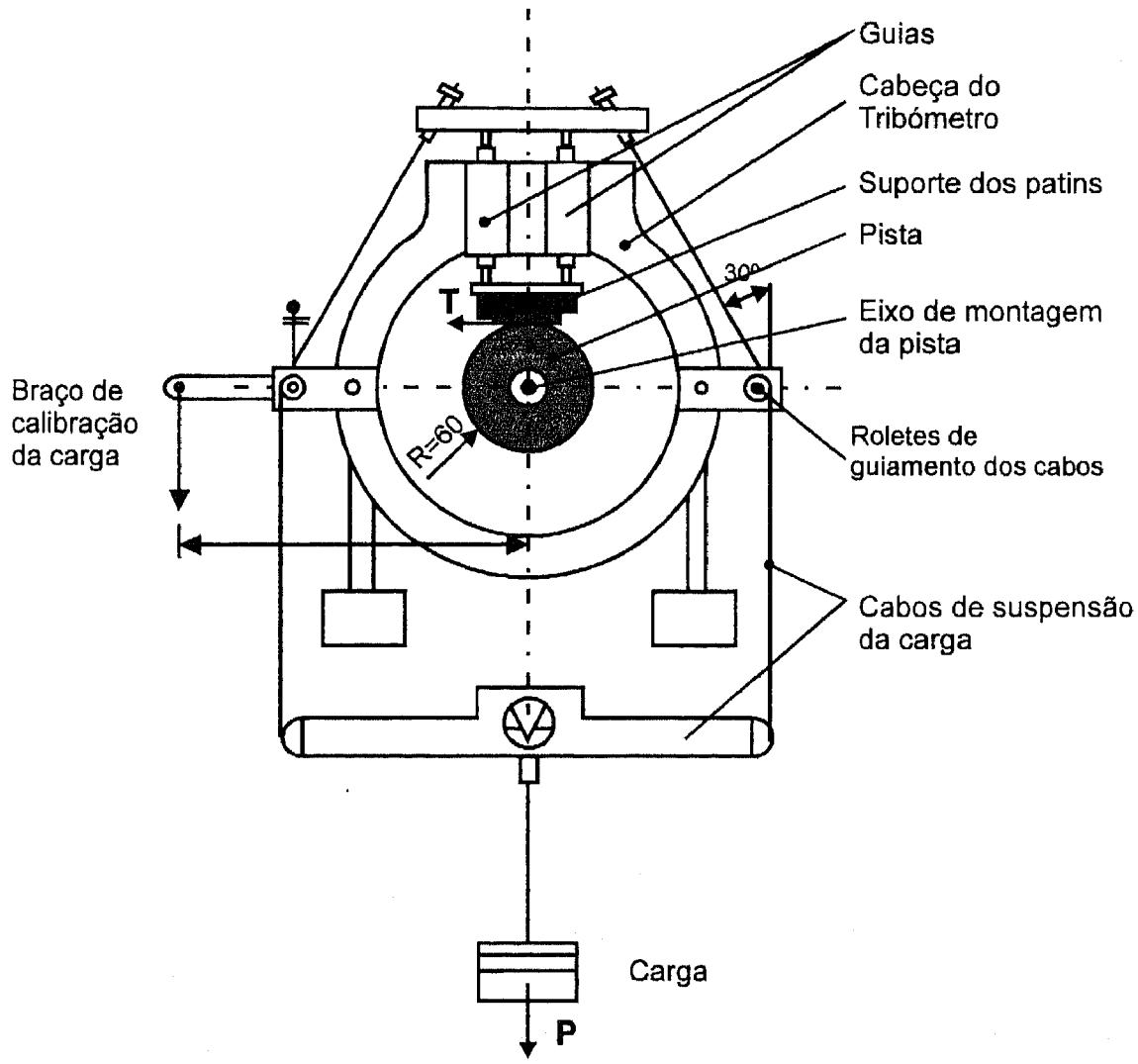


Figura 1.25 - Representação esquemática do tribómetro de Blouet

Analisando a figura, poderá observar-se que a pista é montada num eixo rotativo, accionado por um motor hidráulico, cuja velocidade de rotação é controlada através da manipulação de uma válvula reguladora de caudal.

A parte superior do tribómetro, montada sobre duas guias cilíndricas, possui liberdade de movimento no sentido ascendente/descendente, possibilitando a montagem do patim no respectivo suporte.

O sistema de cabos montado na parte superior do tribómetro permite a aplicação da carga colocada no respectivo suporte ao contacto.

A rotação da cabeça porta-patim está limitada por uma lâmina elástica, sobre a qual estão colocados os extensómetros que permitem quantificar a força de atrito, através do sinal eléctrico que fornecem.

Este tipo de equipamento permite a utilização de cargas entre 70 e 1000 N, e velocidades entre 0 e 18 m/s. Está ainda provido de uma cuba que permite o depósito do fluído necessário à realização de ensaios com lubrificação.

1.4.7 - Resumo do "estado da arte"

O número de trabalhos experimentais realizados com vista ao estudo do comportamento tribológico de revestimentos duros ultrafinos executados por PVD, tem aumentado significativamente nos últimos seis anos. A grande maioria dos trabalhos realizados utilizou configurações do tipo "pino em disco", com cargas e velocidades de deslizamento relativamente baixas.

Na generalidade dos trabalhos desenvolvidos, os dados fornecidos pela realização dos ensaios são agrupados segundo as três vertentes principais que se seguem:

- Estudo do coeficiente de atrito
- Estudo da taxa de desgaste
- Estudo dos mecanismos de desgaste ocorridos ao longo do ensaio

Com base nesta divisão, será apresentado seguidamente um resumo dos resultados obtidos nos diversos trabalhos desenvolvidos nesta área, e que se encontravam publicados na literatura consultada para a realização deste trabalho.

1.4.7.1 - Coeficiente de atrito

A análise do coeficiente de atrito tem conduzido à obtenção de uma grande diversidade de resultados. Shimizaki et al. (1987) e Franklin e Beuger (1992) registaram, no contacto seco entre aço e TiN, coeficientes de atrito iguais e por vezes superiores a 0.6. Por outro lado, trabalhos realizados por Peebles e Pope (1989) e por Habig et al. (1980), obtiveram valores inferiores a 0.17 para o coeficiente de atrito. Para velocidades de deslizamento de 0.2 m/s, Suri et al. (1979) registou coeficientes de atrito de 1.15.

A rugosidade da superfície é um factor muito importante no coeficiente de atrito desenvolvido durante o ensaio. Singer et al. (1991) registaram valores para o coeficiente de atrito situados entre 0.5 e 0.7, no contacto entre uma superfície revestida a TiN e outra de aço, com uma

rugosidade Ra = 0.06 - 0.1 μm. Na mesma situação de contacto, mas tendo sido polida a superfície revestida, e obtida uma rugosidade de 0.004 μm, o coeficiente de atrito inicial baixou para valores situados entre 0.15 e 0.2.

A figura seguinte, apresentado por Holmberg e Matthews (1994), sintetiza alguns dos resultados relativos ao coeficiente de atrito registados até ao momento.

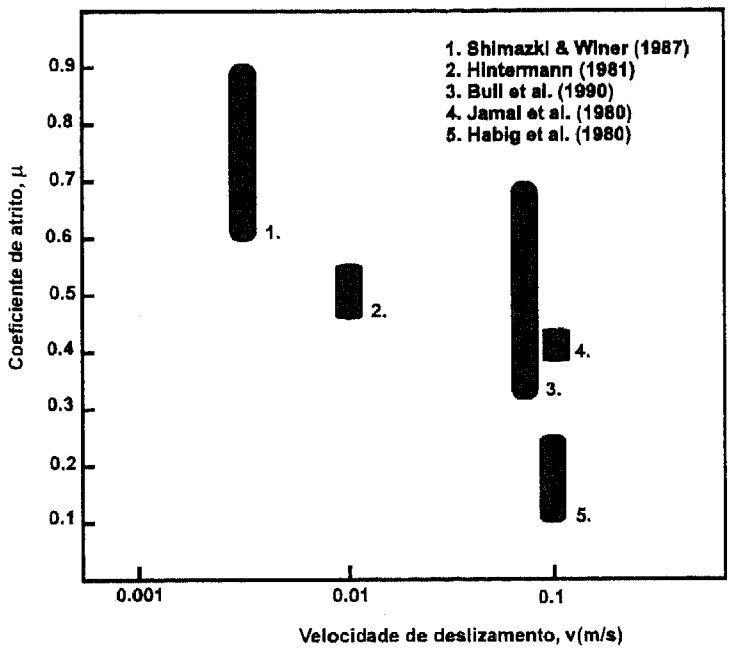


Figura 1.26 - Coeficientes de atrito registados a diferentes velocidades de deslizamento, para um contacto seco entre um pino de aço a deslizar sobre um disco revestido a TiN. (Holmberg e Matthwes, 1994)

Em contactos TiN-TiN e TiN-TiC, têm sido registados valores para o coeficiente de atrito abaixo de 0.2. Estes valores foram obtidos em trabalhos realizados por Jamal et al. (1980), Hinterman (1981), Makela e Valli (1985), Matthews et al. (1987), Habig (1990), Ghosh e Kohler (1992), Stott et al. (1992) e Franklin e Beuger (1992). A obtenção destes valores pode ser explicada, segundo Gardos (1989) pela formação de uma camada de óxido (TiO_{2-x}) na superfície dos revestimentos, de baixa resistência ao corte, que facilita o deslizamento, e se renova facilmente, diminuindo o atrito entre as superfícies. Estudos efectuados por Singer et al. (1991) sobre este tipo de contacto concluíram que, enquanto a carga é suportada pelo revestimento duro, os esforços de corte provocados pelo deslizamento são suportados pela película de óxido formada na superfície.

O atrito comporta-se de forma diferente no vácuo.Estudos desenvolvidos por Habig (1990) demonstraram que os mecanismos de desgaste no vácuo são diferentes daqueles que se processam à pressão atmosférica normal. No vácuo, foram registados valores para o coeficiente de atrito próximos de 0.5, para um contacto TiN-TiN, valores esses que são bastante mais elevados do que os registados à pressão atmosférica.

A temperatura afecta também o atrito. Estudos efectuados por Stott et al. (1992) registaram valores de 0.4 para o coeficiente de atrito, em contactos TiN-TiN efectuados num meio de dióxido de carbono a 300°C. A realização destes estudos permitiu ainda concluir que o revestimento atinge a rotura mais rapidamente nestas condições de ensaio.

Os coeficientes de atrito mais baixos registados até ao momento, e envolvendo superfícies revestidas a TiN, foram obtidos por Singer et al. (1991). Estes estudos, realizados com a configuração "pino em disco", em que o pino era constituído por um monocristal de safira e o disco se encontrava revestido a TiN e polido, registaram valores iniciais para o coeficiente de atrito de 0.05. Durante a realização do ensaio, com uma duração previamente estabelecida de 1500 ciclos, foi registado um incremento do coeficiente de atrito até valores situados entre 0.1 e 0.15. Os ensaios foram efectuados com velocidades de deslocamento compreendidas entre 0.02 e 0.08 m/s, e com cargas que variaram entre os 2 N e os 10 N.

Estudos efectuados por Coll et al. (1992), em contactos entre pinos de aço e discos revestidos a (Ti,Al)N, registaram valores de 0.74 para o coeficiente de atrito, tendo como condições de ensaio uma velocidade de deslizamento de 0.5 m/s e carga de 2 N e em que a liga era constituída por 53% de titânio e 47% de alumínio. Ensaios efectuados nas mesmas condições, mas em que a liga passou a ser constituída por 83% de titânio e 17% de alumínio registou um valor de 0.54 para o coeficiente de atrito. Tendo por base esta última liga, e efectuando o ensaio com uma velocidade de deslocamento de 5 m/s, o coeficiente de atrito baixou para 0.37.

Watanabe et al. (1991) e Miyake et al. (1992) compararam as diferentes formas de nitretos de boro depositados em pastilhas de silício, usando fricção recíproca, concluindo que a forma cúbica do nitreto de boro (c-BN) apresentava um melhor coeficiente de atrito - cerca de 0.3 - do que as formas hexagonais (h-BN) e amorfas (a-BN), que apresentaram valores compreendidos entre 0.8 e 1.0.

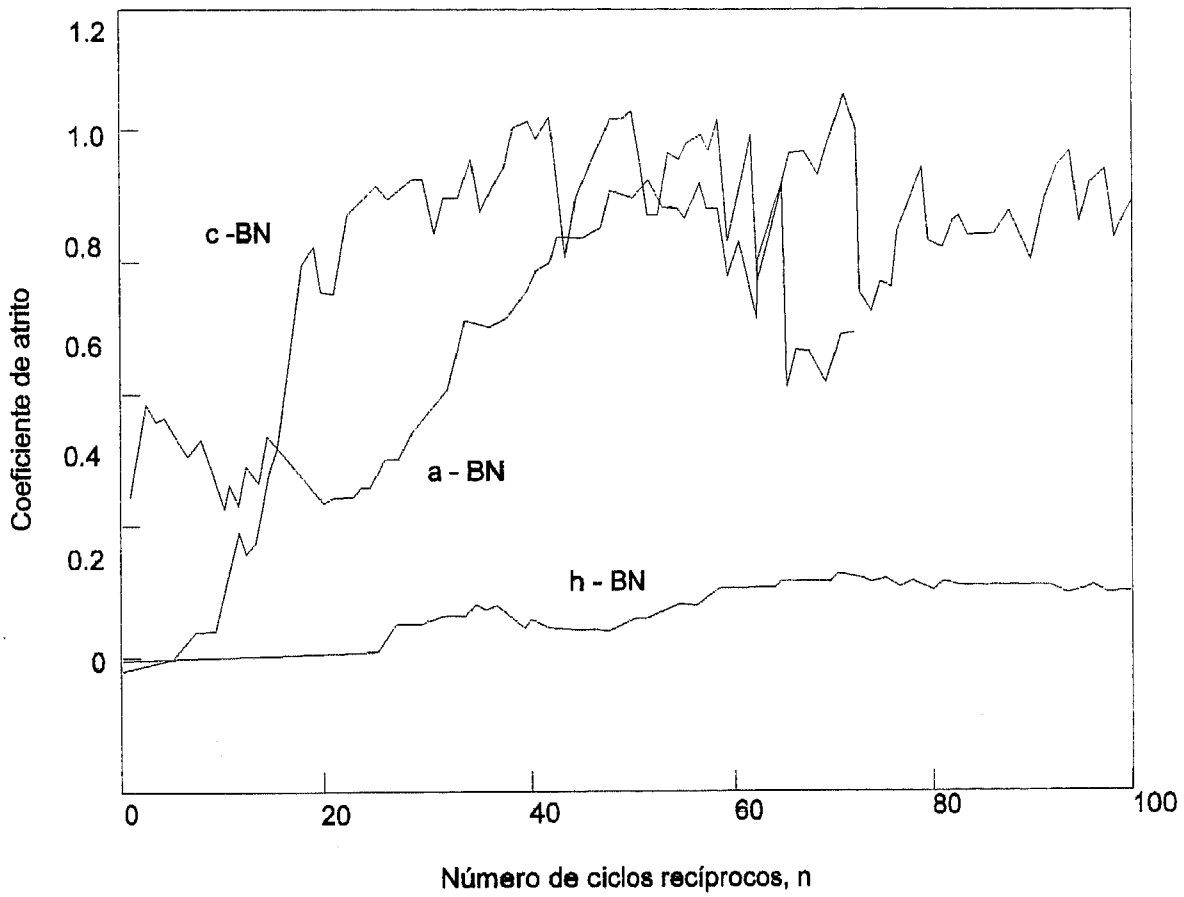


Figura 1.27 - Coeficientes de atrito registados com as diferentes formas cristalográficas dos nitreto de boro (Holmberg e Matthwes, 1994).

Estudos efectuados por Kokner et al. (1996), usando a configuração "pino em disco" e contactos entre pares de revestimentos iguais, efectuados a temperatura ambiente, com uma carga de 3 N e velocidade de deslizamento de 0.3 m/s, conduziram a um coeficiente de atrito de 0.7 para o par TiN-TiN, 0.23 para o par CrN-CrN e 0.28 para o par (Ti,Al)N. Mantendo as restantes condições de ensaio e modificando o meio ambiente de ensaio verificaram que, para o par TiN-TiN, o coeficiente de atrito subiu mais acentuadamente na presença de ar seco, quando comparado com a evolução registada nos ensaios efectuados com ar húmido e com azoto seco.

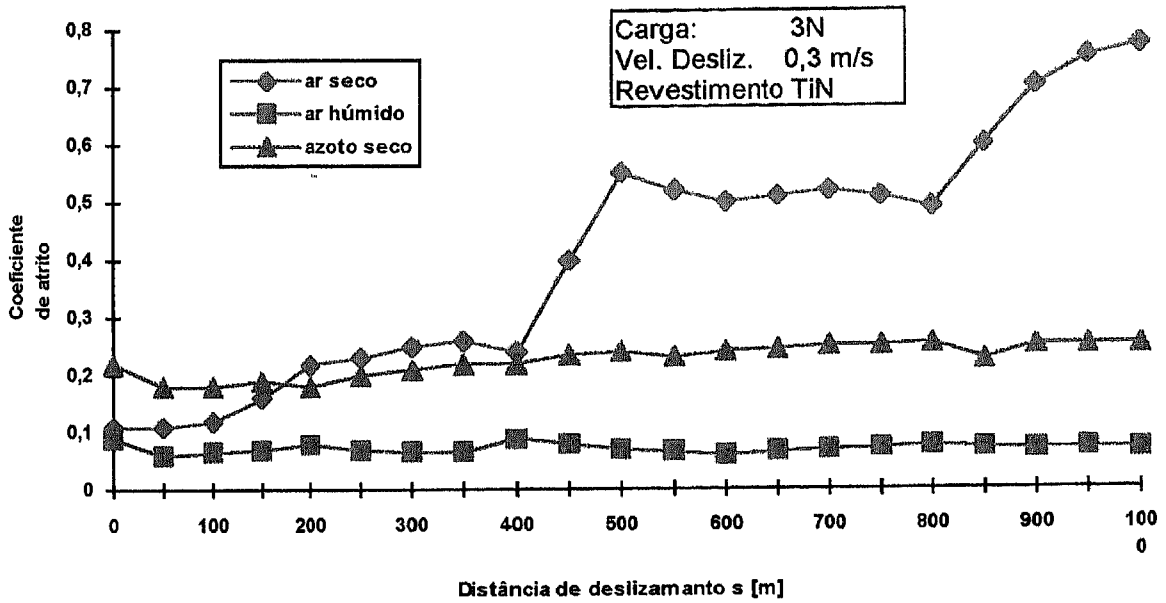


Figura 1.28 - Evolução do coeficiente de atrito no contacto TiN-TiN ao longo de um deslizamento de 1000 metros, com meios ambientes diferentes (Holmberg e Matthwes, 1994)

Comparando as propriedades tribológicas do TiN, (Ti,Al)N, (Ti,Nb)N e Ti(C,N) depositados sobre um aço rápido, e deslizando contra corundum, Vancoill et al. (1993) concluiu que o Ti(C,N) apresentava o menor coeficiente de atrito, para uma carga de 5 N e uma velocidade de deslizamento de 0.1 m/s. A superfície revestida a Ti(C,N) apresentou valores compreendidos entre 0.1 e 0.4 para o coeficiente de atrito, enquanto o TiN, o (Ti,Nb)N e o (Ti,Al)N apresentaram valores compreendidos entre 0.8 e 1.2, 0.8 e 1.4, e 1.0 e 1.4, respectivamente.

Estudos efectuados por Wang, Fernandez, Tucho e Rincon (1996), usando a configuração patim em pista, e para um contacto entre aço AISI D2 e uma superfície revestida a Cr_2O_3 deslizando a diferentes velocidades e sujeita a uma carga de 61.3 N, registaram valores de coeficiente de atrito compreendidos entre 1.5 e 0.5, conforme está patente na figura 1.29.

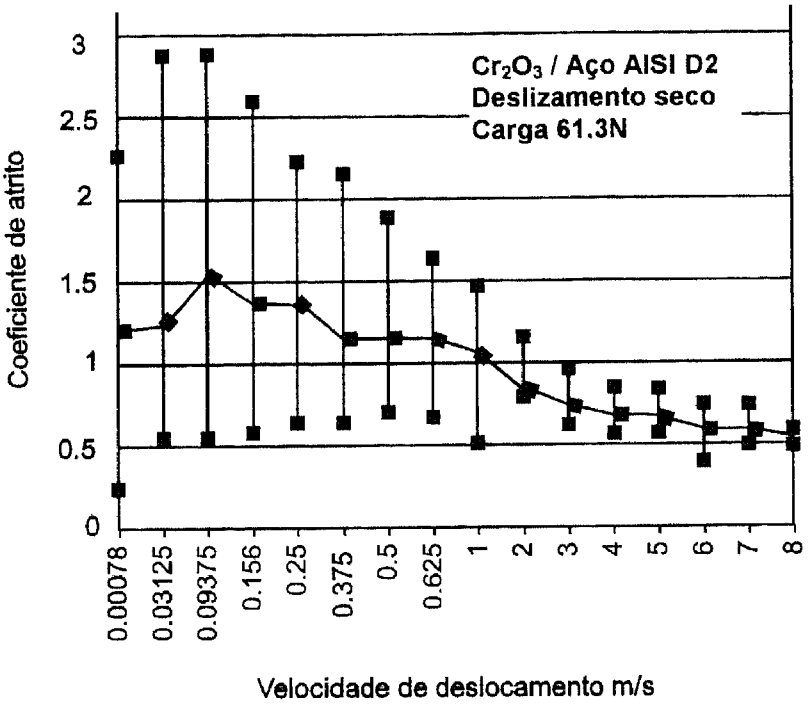


Figura 1.29 - Representação gráfica do coeficiente de atrito no contacto de deslizamento seco entre uma superfície revestida a Cr_2O_3 e outra de aço AISI D2, sujeito a uma carga de 61;3 N. (Wang et al., 1996)

1.4.7.2 - Desgaste

Uma das vertentes mais importantes a analisar nos ensaios de comportamento tribológico de superfícies revestidas, é o volume ou massa de material removido da superfície durante a realização do ensaio. A taxa de desgaste, utilizada por muitos autores para exprimir a resistência ao desgaste da superfície, relaciona o volume de material removido da superfície, em mm^3, com a carga aplicada ao contacto, em Newtons, e o comprimento de deslizamento percorrido no ensaio, em metros.

Estudos efectuados por Roos et al. (1990) com superfícies revestidas a (Ti,Al)N e TiN, revelaram que o primeiro apresentava uma taxa de desgaste duas vezes superior ao segundo. Estudos efectuados por Coll et al. (1992) com uma configuração "pino em disco" no contacto entre aço e (Ti,Al)N a uma velocidade de deslizamento de 0.5 m/s, e carga de 2 N, foi registada uma taxa de desgaste de 0.092×10^{-6} mm^3/Nm, para uma liga com 53% de titânio e 47% de alumínio. Mantendo as condições de ensaio, e fazendo variar os teores em peso dos elementos da liga para 83% de titânio e 17% de alumínio, a taxa de desgaste baixou para 0.056×10^{-6} mm^3/Nm.

Bull e Rickerby (1990), em estudos efectuados em máquina "pino em disco", com o pino de aço a deslizar sobre uma superfície revestida a CrN, registou taxas de desgaste compreendidas entre 1 e $100x10^{-6}$ mm^3/Nm para o disco revestido, e de 0.1 a $10x10^{-6}$ mm^3/Nm para o pino, tendo sido ainda registada uma considerável transferência de material do disco para o pino.

Estudos efectuados por Ronkainen et al. (1990), com contacto entre aço N50 e superfícies revestidas a Ti(B,N) produzidas por deposição catódica com magnetron, e tendo como fonte de energia corrente de alta frequência, registaram valores de taxa de desgaste para o disco revestido de $15x10^{-6}$ mm^3/Nm e de $0.8x10^{-6}$ mm^3/Nm para o pino, com uma velocidade de deslocamento de 0.1 m/s e carga de 10 N.

Kokner et al., (1996) realizaram estudos com base numa configuração "pino em disco" entre pares providas do mesmo revestimento, registaram taxas de desgaste menores para os pares CrN-CrN e (Ti,Al)N-(Ti,Al)N do que para o par TiN-TiN, para temperaturas de ensaio até 110°C.

Estudos efectuados por Wang et al., (1996), utilizando uma configuração "patim em pista", e estando o patim revestido a Cr_2O_3 a deslizar sobre uma pista de aço AISI D2 com uma velocidade de 1 m/s e sujeito a uma carga de 88.5 N, registaram para o patim um volume de desgaste de 2.1 mm^3 ao fim de 10000 ciclos, de 2.3 mm^3 ao fim de 20000 ciclos e de 5.2 mm^3 ao fim de 40000 ciclos, e um desgaste 50% superior para a superfície de aço AISI D2. A figura 1.30 ilustra os resultados obtidos neste estudo.

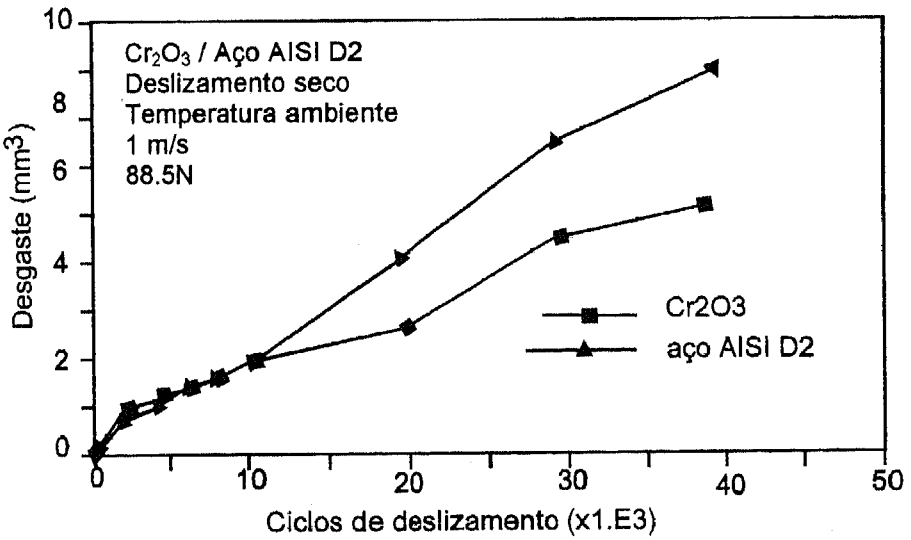


Figura 1.30 - Evolução do volume de desgaste registado ao longo de um ensaio tipo "patim em pista" efectuado por Wang et al.(1996), com superfícies revestidas a Cr_2O_3 em contacto com aço AISI D2.

Os mesmos autores concluíram ainda que a velocidade de deslizamento influencia fortemente o desgaste, tendo obtido o menor desgaste para uma velocidade de 1 m/s, e o maior desgaste para uma velocidade de 3 m/s, como é ilustrado na figura 1.31.

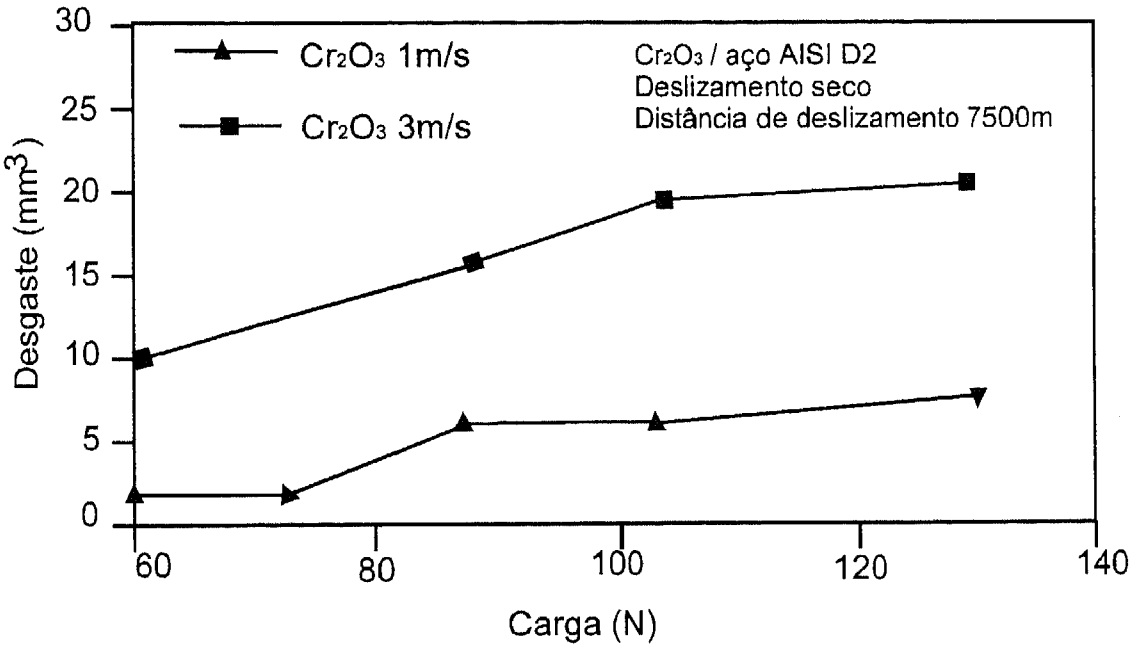


Figura 1.31 - Desgaste em função da carga no contacto seco entre uma superfície revestida a Cr_2O_3 e outra de aço AISI D2 a diferentes velocidades.(Wang et al., 1996)

1.4.7.3 - Mecanismos de desgaste

No contacto entre superfícies revestidas a TiN e superfícies em aço, existem quatro regimes de funcionamento, até que seja atingida a destruição completa do revestimento (Holmberg e Matthews, 1994). Os mecanismos de desgaste são distintos em cada regime de funcionamento, podendo ser descritos da forma seguinte:

1. Desgaste inicial, com libertação de partículas muito pequenas, e com aumento do coeficiente de atrito. Fase designada normalmente por rodagem.
2. Formação de uma película na superfície não revestida, com subida do coeficiente de atrito e desgaste.
3. Estabilização do desgaste e do coeficiente de atrito.
4. Destruição do revestimento e subida significativa do desgaste e coeficiente de atrito.

Nos contactos entre superfícies revestidas, como por exemplo TiN-TiN, a formação de uma camada de óxido de baixa resistência ao corte conduz a melhores condições de contacto, já que as superfícies duras suportam a carga no contacto e a camada de óxido suporta as tensões de corte provocadas pelo movimento de deslizamento.

2. TRABALHO EXPERIMENTAL

A realização do trabalho experimental teve lugar no laboratório de tribologia da FEUP, onde está instalado o tribómetro de Blouet que foi utilizado na execução dos ensaios. O trabalho experimental foi precedido da selecção dos materiais a utilizar como substrato e revestimentos, preparação dos respectivos provetes, análise das superfícies, elaboração do plano de ensaios e definição dos parâmetros a impôr e a recolher em cada ensaio.

2.1 - Selecção dos materiais

A selecção dos materiais a utilizar como substrato e revestimentos teve como limitação a oferta de aços existente no nosso mercado, e a existência de alvos em número suficiente para que pudessem ser executados os revestimentos pretendidos.

A escolha do substrato recaiu sobre o aço AISI 52100, cuja designação DIN é 100Cr6, e com a designação comercial de C220 (F. Ramada). Este aço, próprio para ferramentas de trabalho a frio, está indicado pelo fabricante como apto para ser utilizado no fabrico de pontos para tornos, roletes, anéis de rolamentos, cavilhas, casquilhos, anilhas e rolos de apoio, ou seja, peças fortemente solicitadas e sujeitas a grande desgaste. O aço 100Cr6 é utilizado quase universalmente para o fabrico de rolamentos "standard", sendo provavelmente um dos aços de maior consumo mundial. Este aço é ainda utilizado com frequência como substrato em estudos de comportamento tribológico de superfícies revestidas. É fornecido no estado de recozido, com uma dureza de 225 HB. A sua composição química é a seguinte:

1% de Carbono
0.25% de Silício
0.3% de Manganês
1.5% de Crómio

Relativamente aos materiais a utilizar como revestimento, e dentro das disponibilidades oferecidas pela empresa que realizou o trabalho de revestimento, foi possível seleccionar três tipos de nitretos: TiN, ZrN e (Ti,Zr)N.

2.2 - Preparação dos provetes

A maquinagem dos provetes obedeceu aos desenhos existentes para o efeito, estando estes devidamente preparados para a respectiva montagem no tribómetro de Blouet. O desenho dos provetes é apresentado na figura 2.1.

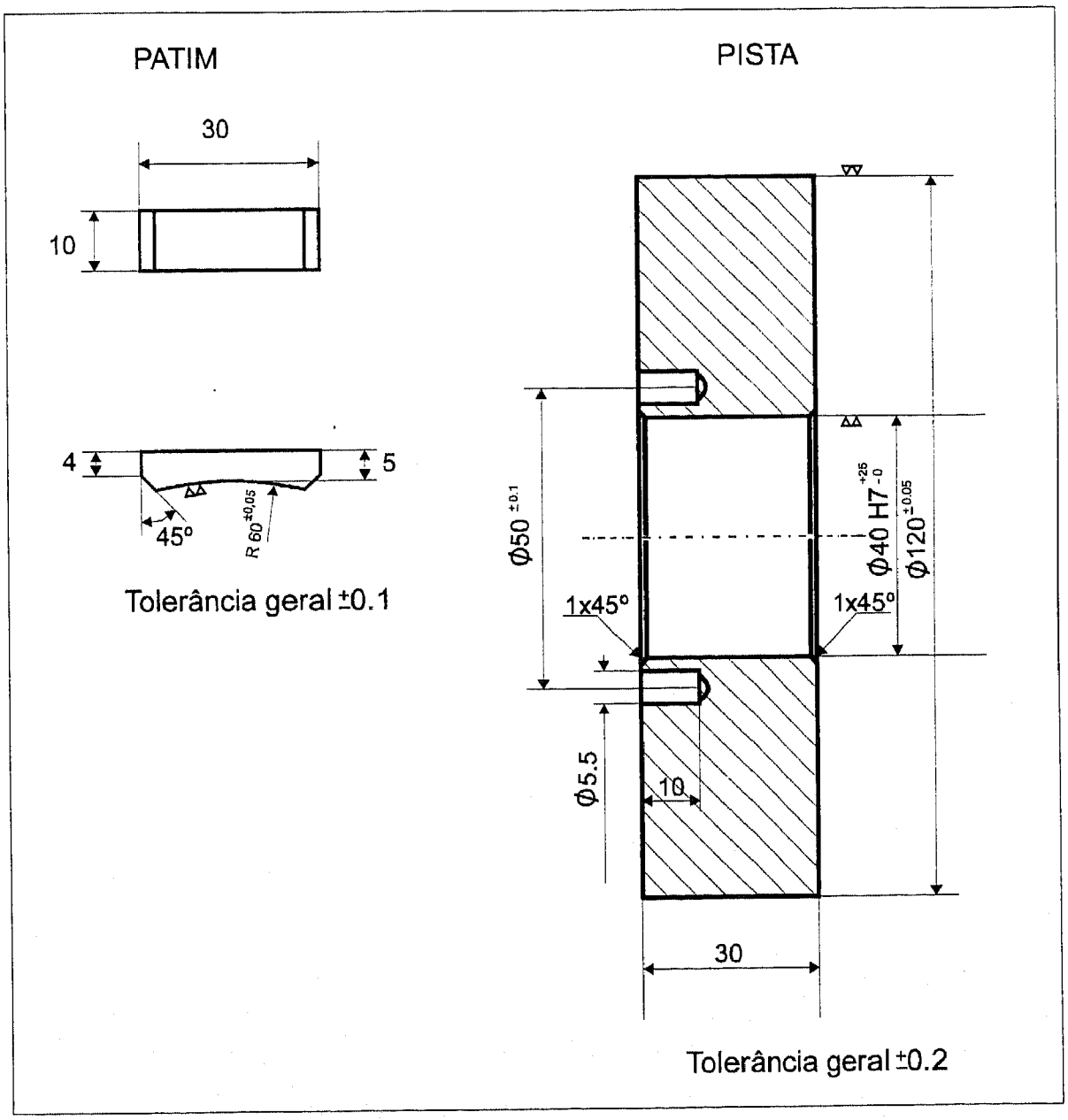


Figura 2.1 - Desenho do patim e pista utilizados nos ensaios

De referir que as pistas foram obtidas por torneamento de um varão de 130mm de diâmetro, enquanto os patins foram obtidos por torneamento interior de um varão de 150mm de diâmetro, em grupos de dez, sendo posteriormente separados e frezados, com o objectivo de adquirirem as superfícies de assentamento necessárias á sua montagem no tribómetro.

Com vista a um aumento da dureza superficial dos provetes antes de serem revestidos, foi efectuada uma nitruração iónica em todos os provetes. Foi escolhido este tipo de tratamento por ser aquele que oferecia menores riscos de deformação dos provetes.

Seguidamente, as pistas foram rectificadas. Os patins não sofreram qualquer outra maquinagem, após o tratamento a que foram sujeitos.

Nesta fase, todos os provetes se encontravam preparados para serem revestidos, pelo que foram separados em grupos, e numerados, em função do tipo de revestimento a que iam ser sujeitos.

Os revestimentos foram efectuados por fases. Numa primeira fase foram efectuados os revestimentos de TiN. O processo de revestimento utilizou três alvos de titânio, e o total de peças a revestir com este material foi dividido em duas séries, já que o volume disponível da câmara não permitia a montagem simultânea de todos os provetes, com o tipo de fixação e disposição pretendidas.

Os relatórios de execução dos revestimentos, com a indicação dos parâmetros utilizados, foi amavelmente cedida pelo fabricante, tendo sido remetidos para um dos anexos deste trabalho.

Foi adoptada a mesma metodologia para uma segunda fase, em que foi depositada a liga (Ti,Zr)N. Para a deposição desta liga foram utilizados dois alvos de titânio e um de zircónio.

Numa última fase, foi realizado o revestimento com ZrN, com recurso a três alvos de zircónio, seguindo a metodologia anteriormente descrita.

2.3 - Análise das superfícies

A análise das superficies foi efectuada segundo cinco vertentes: análise da morfologia da superfície, análise e quantificação da espessura da película de revestimento, análise da composição química da película de revestimento, análise da rugosidade da superficie e quantificação da dureza superficial.

2.3.1 - Análise da morfologia das superfícies

A análise da morfologia das superfícies foi efectuada por SEM, sobre amostras com geometria idêntica á das pistas, mas de menor espessura. Estas amostras foram revestidas juntamente com as pistas utilizadas no trabalho, e sujeitas ao mesmo posicionamento na câmara de revestimento.

A observação efectuada por SEM proporcionou a obtenção das fotos que seguidamente se apresentam.

Conforme se poderá constatar por observação dessas fotos, a morfologia das superfícies de TiN e (Ti,Zr)N são muito idênticas, revelando a existência de uma estrutura essencialmente colunar, enquanto a superfície de ZrN apresenta um aspecto bastante mais globular.

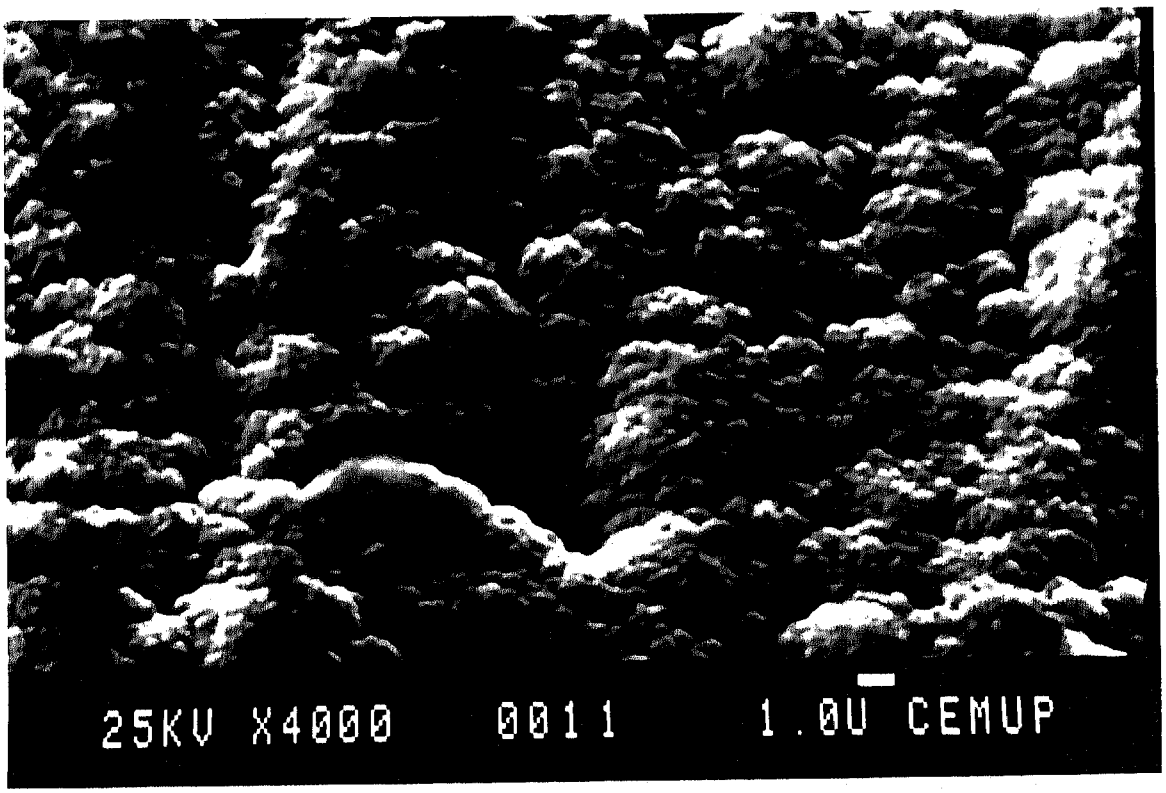


Figura 2.2 - Aspecto da morfologia da superfície revestida a TiN, ampliada 4000 vezes

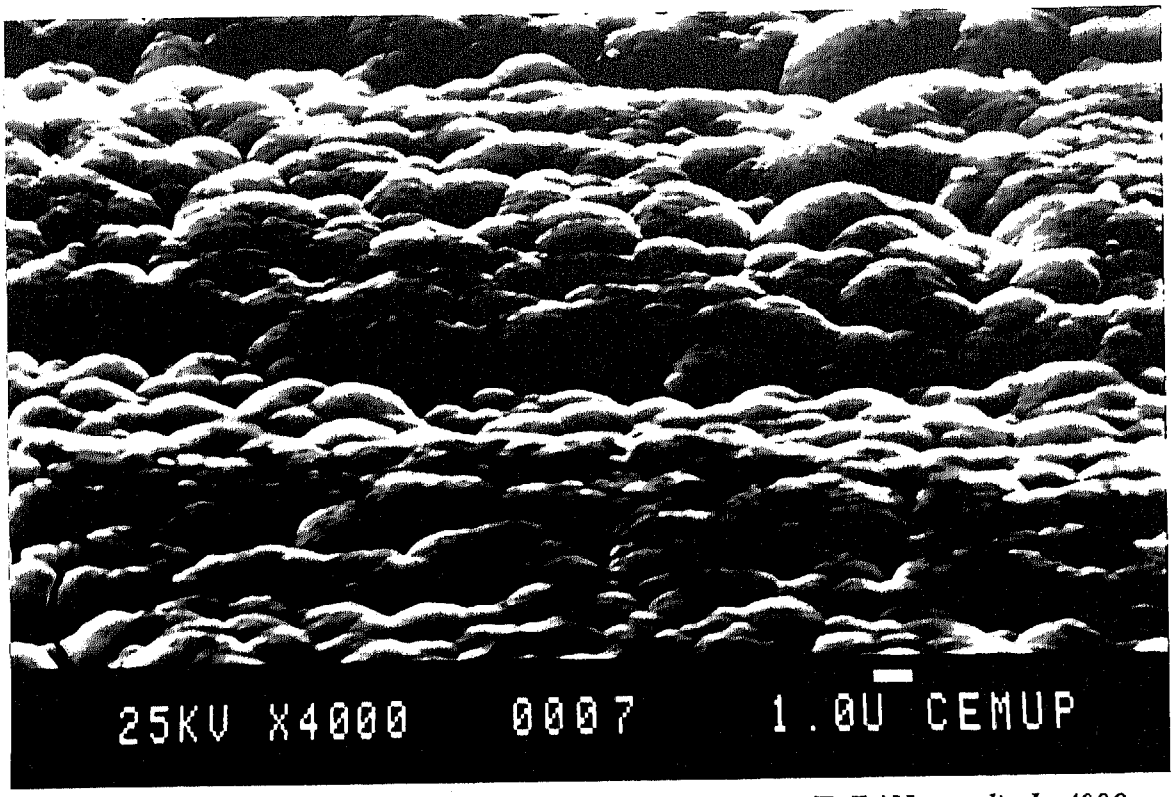


Figura 2.3 - Aspecto da morfologia da superfície revestida a (Ti,Zr)N, ampliada 4000 vezes

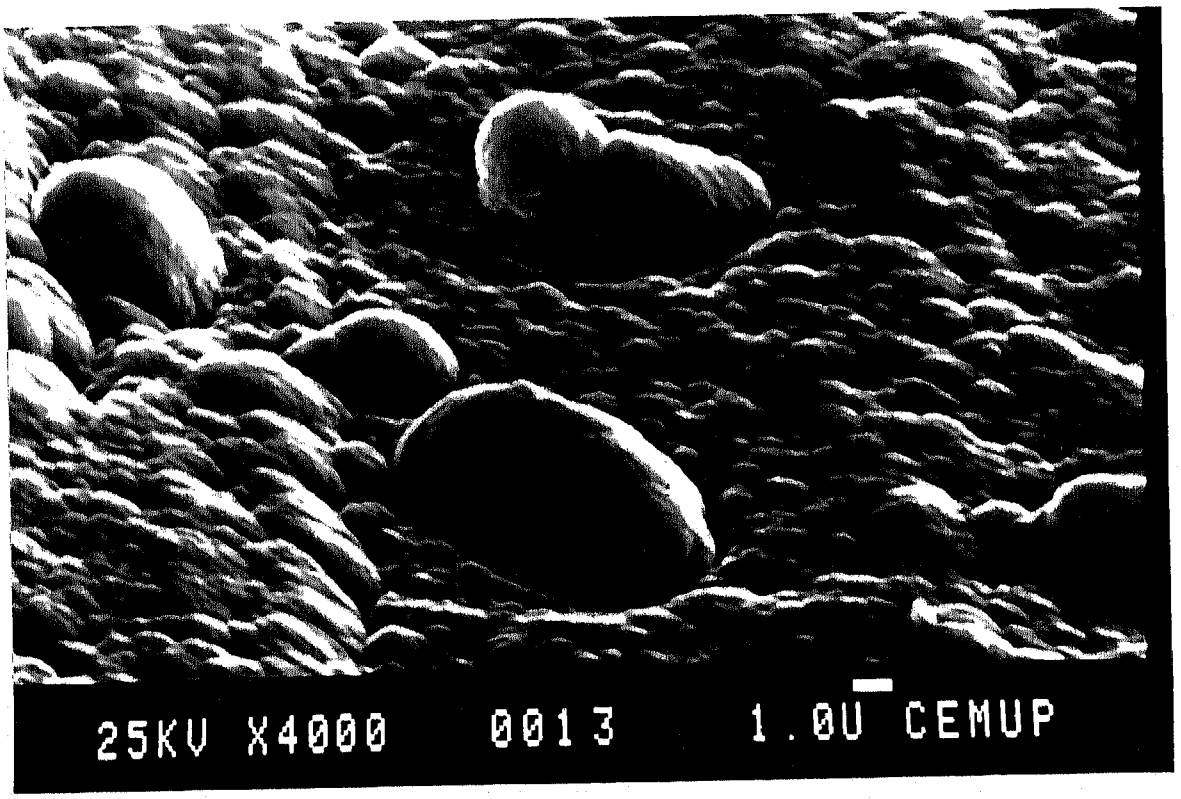


Figura 2.4 - Aspecto da morfologia da superfície revestida a ZrN, ampliada 4000 vezes

2.3.2 - Análise e quantificação da espessura da película de revestimento

Para se proceder à análise e quantificação da espessura das películas, foi utilizado um disco com o mesmo diâmetro das pistas, e revestido juntamente com estas. Este disco foi cortado de modo a que fosse possível efectuar um entalhe interior ao revestimento, e seguidamente proceder à sua fractura, minimizando a deformação plástica no substrato e revestimento antes da rotura. Desta forma, foi possível observar a película de revestimento de topo, conforme a tecnologia SEM exige.

Com as amostras colocadas de forma adequada, foi possível observar a película de topo, e quantificar a espessura de cada um dos revestimentos. As fotos reproduzidas nas figuras 2.5, 2.6 e 2.7 ilustram as imagens obtidas.

A observação atenta da foto da figura 2.7, referente à película de (Ti,Zr)N, revela-nos que existem duas películas sobrepostas de revestimento, e não apenas uma como seria esperado. Tal facto,segundo o fabricante, ficou a dever-se à necessidade de interromper o processo, por razões não divulgadas, tendo sido retomado posteriormente e tendo conduzido à deposição de uma nova película. Esta mesma imagem revela-nos ainda que a adesão entre as duas películas depositadas é muito boa já que, mesmo após o esforço aplicado na rotura do revestimento que conduziu, apesar de todos os cuidados, a uma pequena deformação plástica, não foi suficiente para separar as duas películas de revestimento.

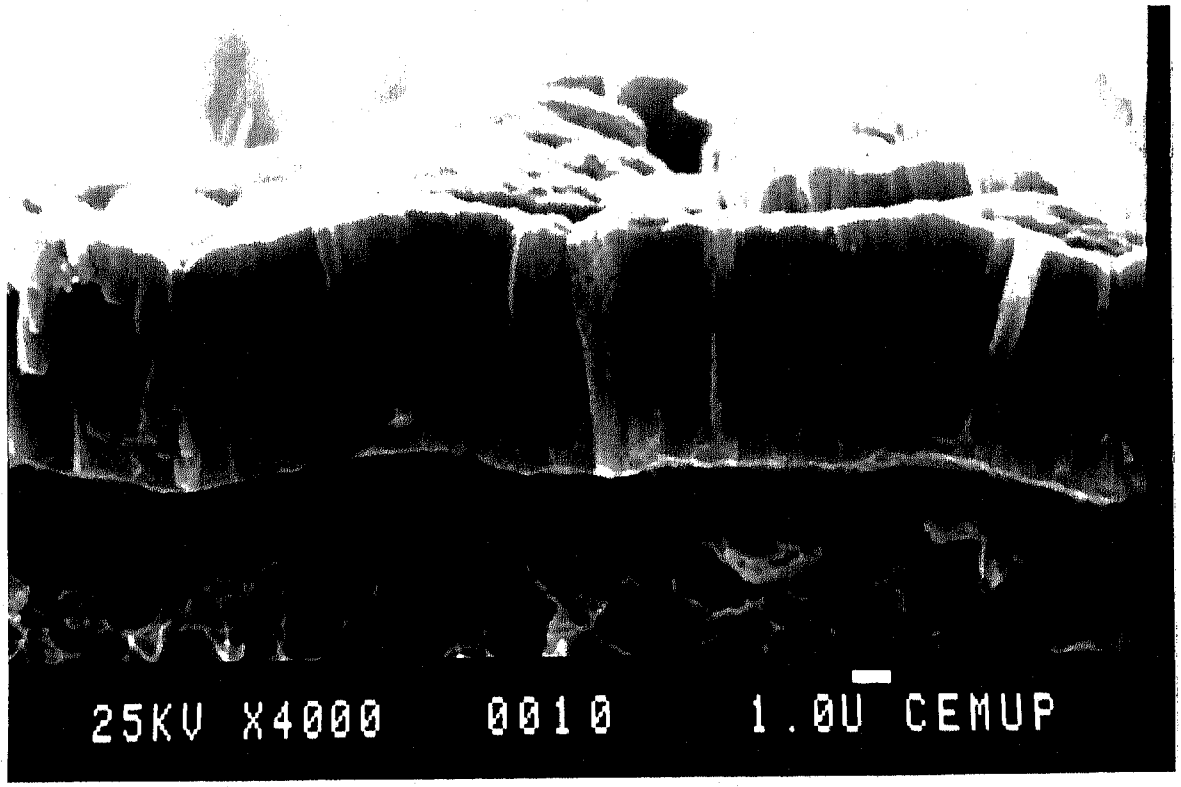


Figura 2.5 - Película de TiN observada de topo por SEM, e ampliada 4000 vezes

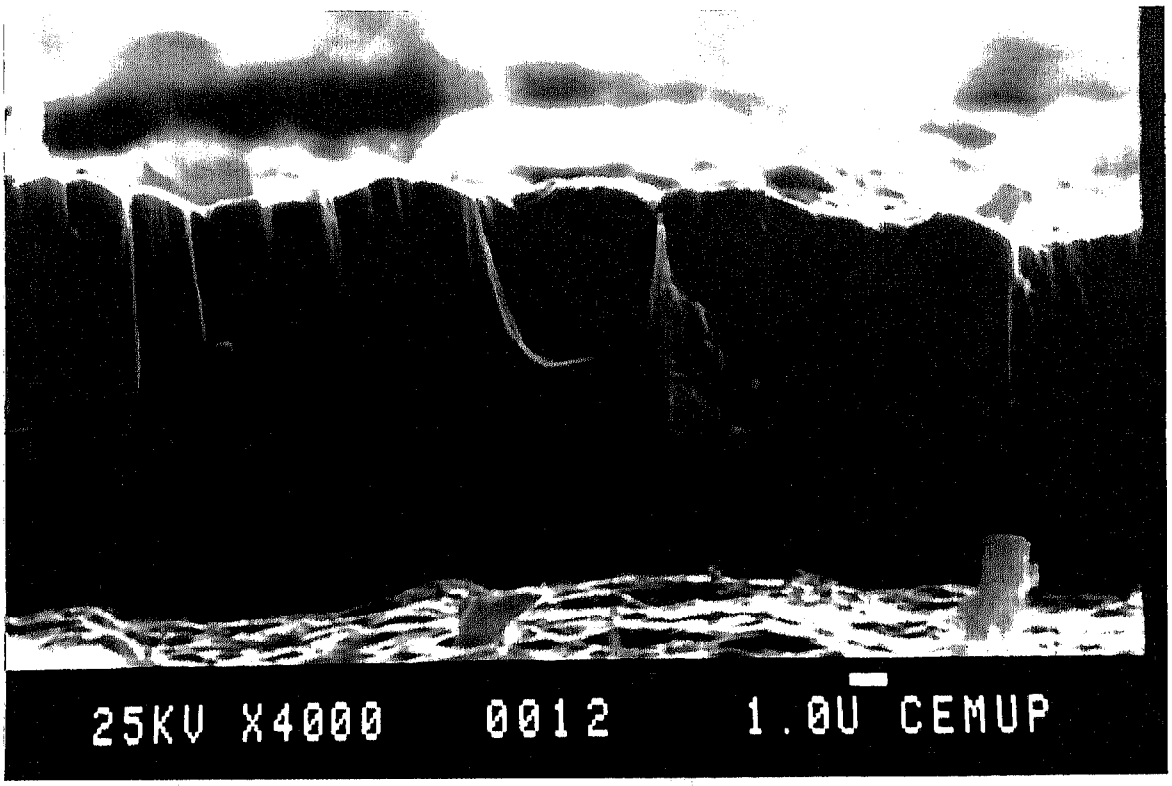


Figura 2.6 - Película de ZrN observada de topo por SEM e ampliada 4000 vezes

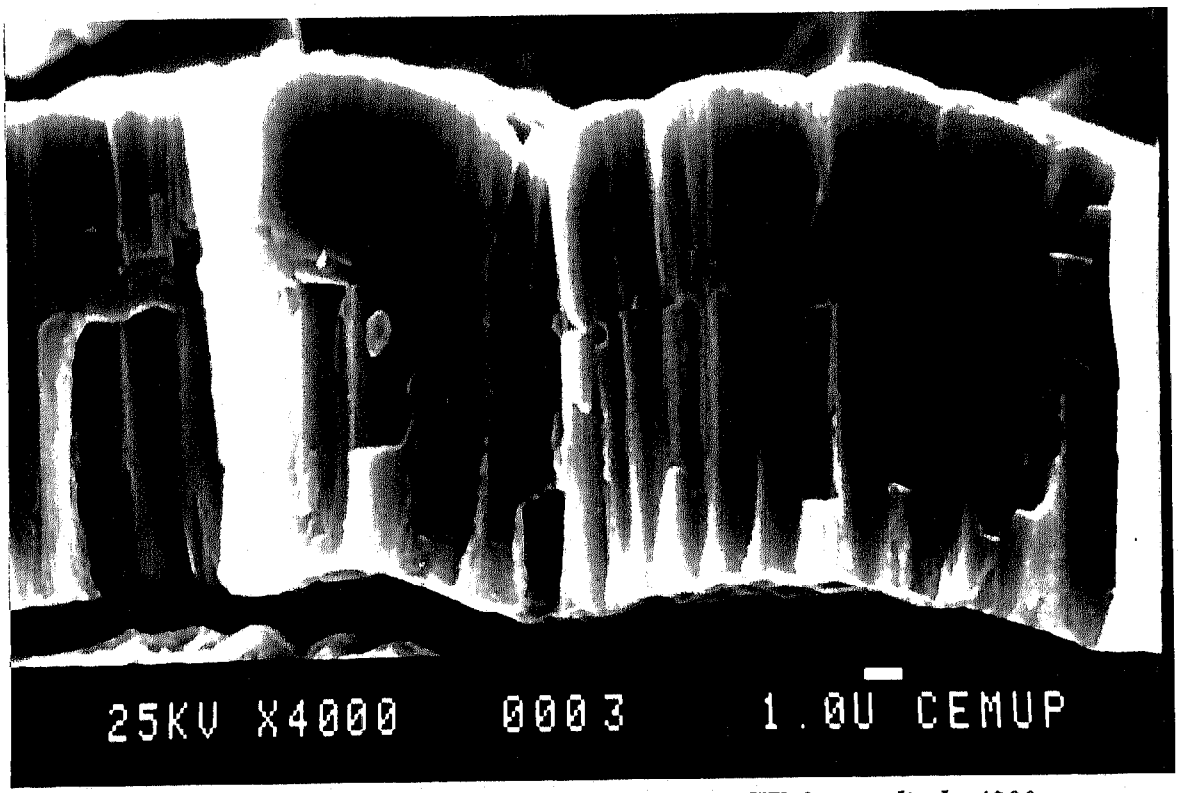


Figura 2.7 - Película de (Ti,Zr)N observada de topo por SEM e ampliada 4000 vezes

A observação da imagem 2.7 permitiu ainda notar alguma diferença entre o brilho apresentado pela película inferior relativamente á película superior. Foi então realizada uma

imagem com recurso a electrões secundários retrodifundidos, que permitiu confirmar essa observação.

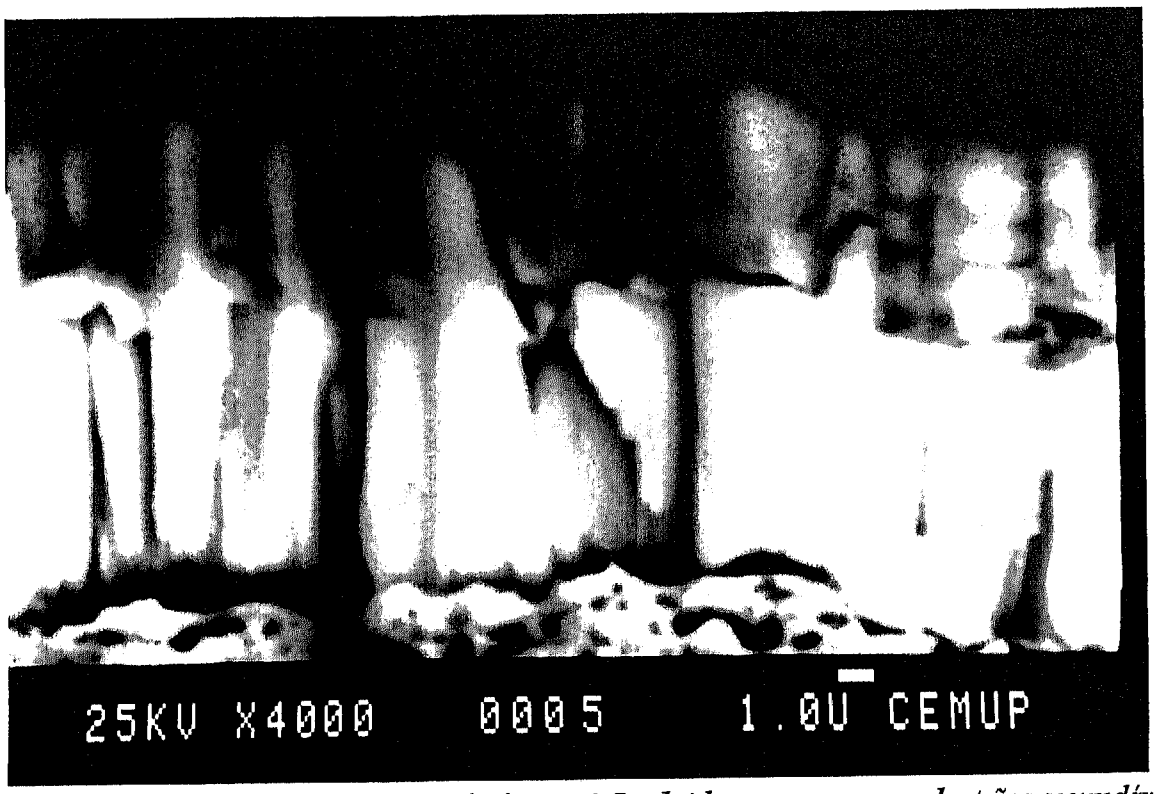
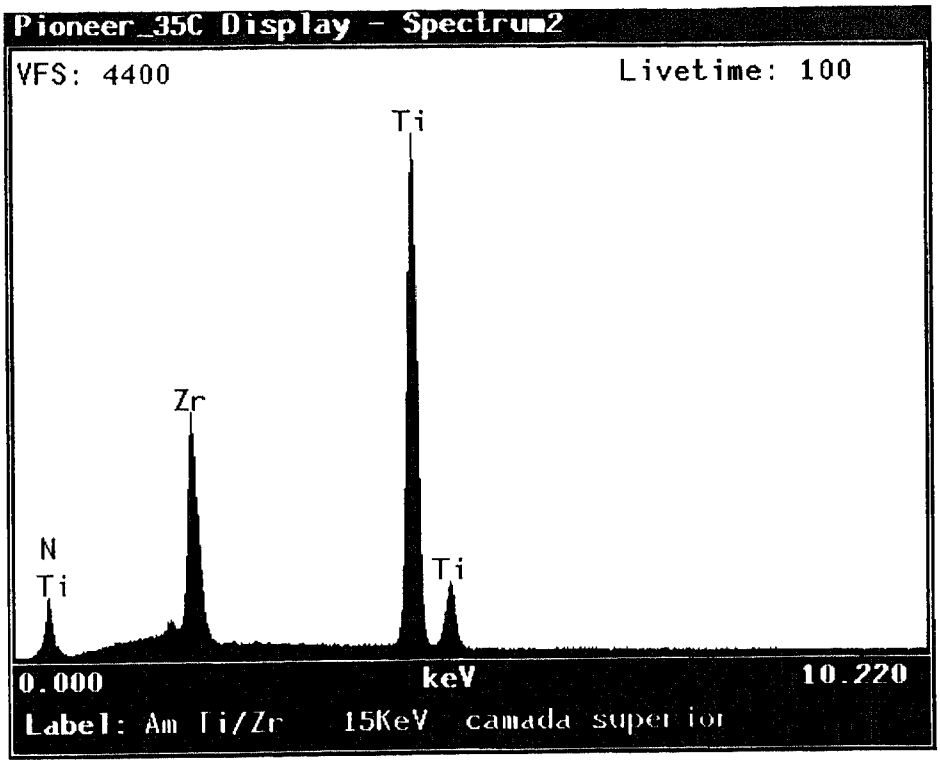


Figura 2.8 - Duplicado da imagem da figura 2.7, obtida com recurso a electrões secundários retrodifundidos

Uma análise efectuada por EDS veio provar que a camada inferior era mais rica em zircónio, e a camada superior mais rica em titânio. Os respectivos espectros de composição estão apresentados nas figuras 2.9 e 2.10.



Thu Dec 12 18:52:55 1996

Am Ti/Zr 15KeV camada superior

Chi-sqd = 1.86 Livetime = 100.0 Sec.
Standardless Analysis

Element	Relative k-ratio	Error (1-Sigma)	Net Counts	Error (1-Sigma)
Ti-K	0.80144	+/- 0.00465	63375	+/- 368
Ti-L	---	---	4986	+/- 143
Zr-L	0.19856	+/- 0.00253	31411	+/- 401

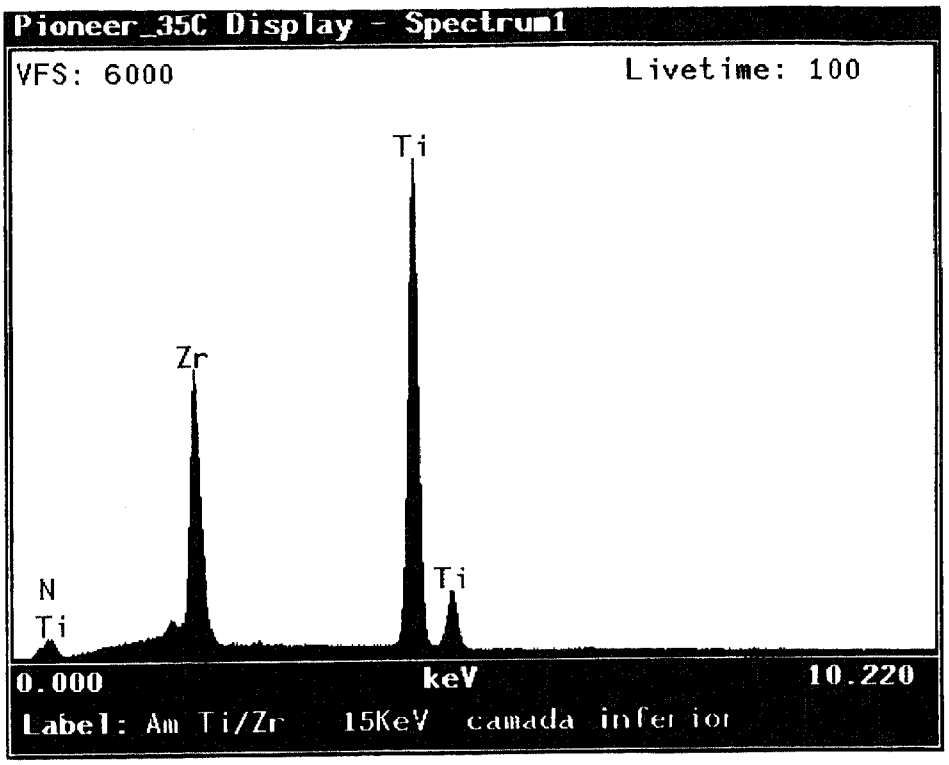
Adjustment Factors	K	L	M
Z-Balance:	0.0000	0.0000	0.0000
Shell:	1.0000	1.0000	1.0000

PROZA Correction Acc.Volt.= 15 kV Take-off Angle=35.00 deg
Number of Iterations = 4

Element	k-ratio (calc.)	ZAF	Atom %	Element Wt %	Wt % Err. (1-Sigma)	Compound Formula	Compound Wt %
Ti-K	0.58202	1.066	43.65	62.04	+/- 0.36	TiN	80.18
Zr-L	0.14419	1.192	6.35	17.18	+/- 0.22	ZrN	19.82
N -K	---	2.268	50.00	20.78 S	---	---	---
Total			100.00	100.00			100.00

Table Symbols: S -- Wt.% calculated by Stoichiometry

Figura 2.9 - Espectro da composição da camada superior do revestimento de (Ti, Zr) N, obtido por EDS



Thu Dec 12 18:56:33 1996

Am Ti/Zr 15KeV camada inferior

Chi-sqd = 2.30 Livetime = 100.0 Sec.
Standardless Analysis

Element	Relative k-ratio	Error (1-Sigma)	Net Counts	Error (1-Sigma)
Ti-K	0.75771 +/-	0.00387	84681 +/-	433
Ti-L	---	---	3168 +/-	144
Zr-L	0.24229 +/-	0.00229	54170 +/-	513

Adjustment Factors	K	L	M
Z-Balance:	0.0000	0.0000	0.0000
Shell:	1.0000	1.0000	1.0000

PROZA Correction Acc.Volt.= 15 kV Take-off Angle=35.00 deg
Number of Iterations = 4

Element	k-ratio (calc.)	ZAF	Atom %	Element Wt %	Wt % Err. (1-Sigma)	Compound Formula	Compound Wt %
Ti-K	0.55086	1.067	42.15	58.76	+/- 0.30	TiN	75.94
Zr-L	0.17615	1.184	7.85	20.86	+/- 0.20	ZrN	24.06
N -K	---	2.499	50.00	20.38 S	---	---	---
Total			100.00	100.00			100.00

Table Symbols: S -- Wt.% calculated by Stoichiometry

Figura 2.10 - Espectro da composição da camada inferior do revestimento de (Ti, Zr) N, obtido por EDS

A relação entre a morfologia apresentada pela superfície da película superior, da película intermédia e do substrato, podem ser observadas na figura 2.11.

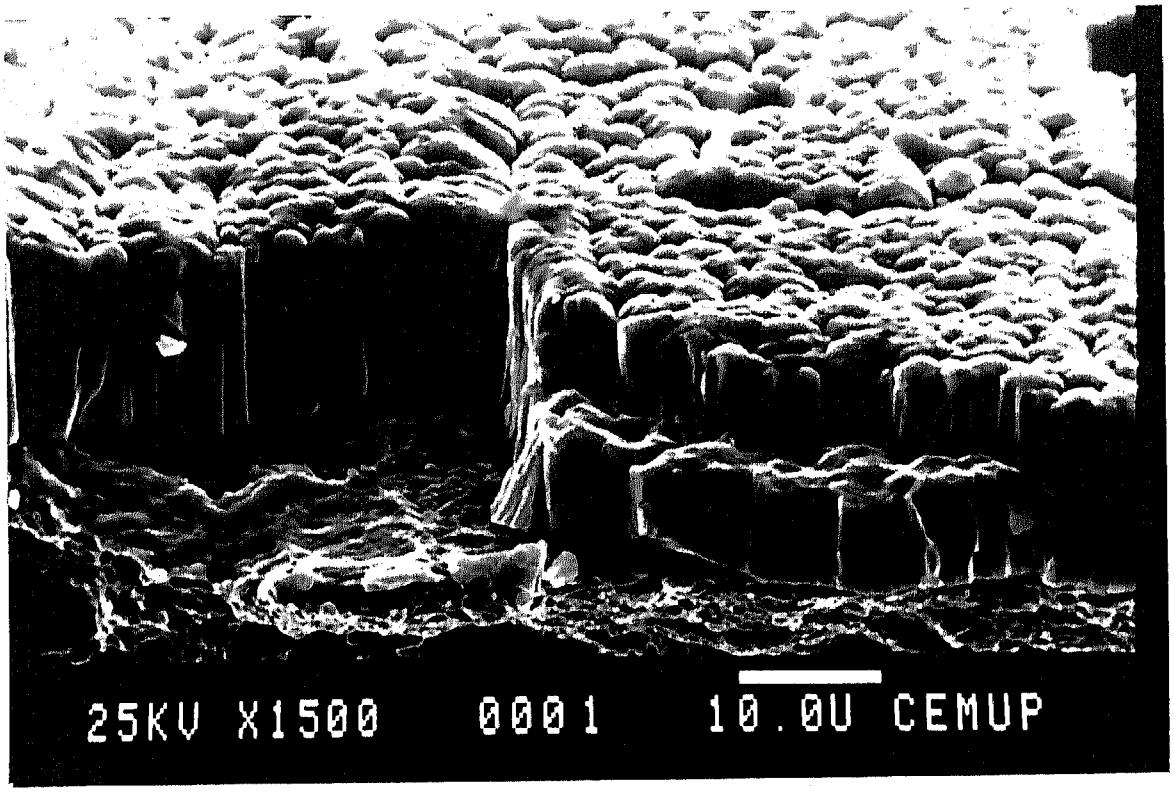


Figura 2.11 - Morfologia da camada superior e inferior do revestimento de (Ti,Zr)N, comparativamente ao substrato

A observação das figuras anteriores permitiu ainda realizar a medição da espessura de cada revestimento, que conduziu aos seguintes valores:

- Película de TiN: 6.8 μm
- Película de ZrN: 6.6 μm
- Película de (Ti,Zr)N: 8 + 6 μm = 14 μm

A película de (Ti,Zr)N apresentou uma espessura que ultrapassou ligeiramente o valor máximo pretendido para o revestimento, que era de 10 mm.

2.3.3 - Análise da composição da película

A análise da composição das películas foi efectuada por EDS. Os espectros fornecidos pelo sistema poderão ser observados nas figuras 2.12, 2.13 e 2.14.

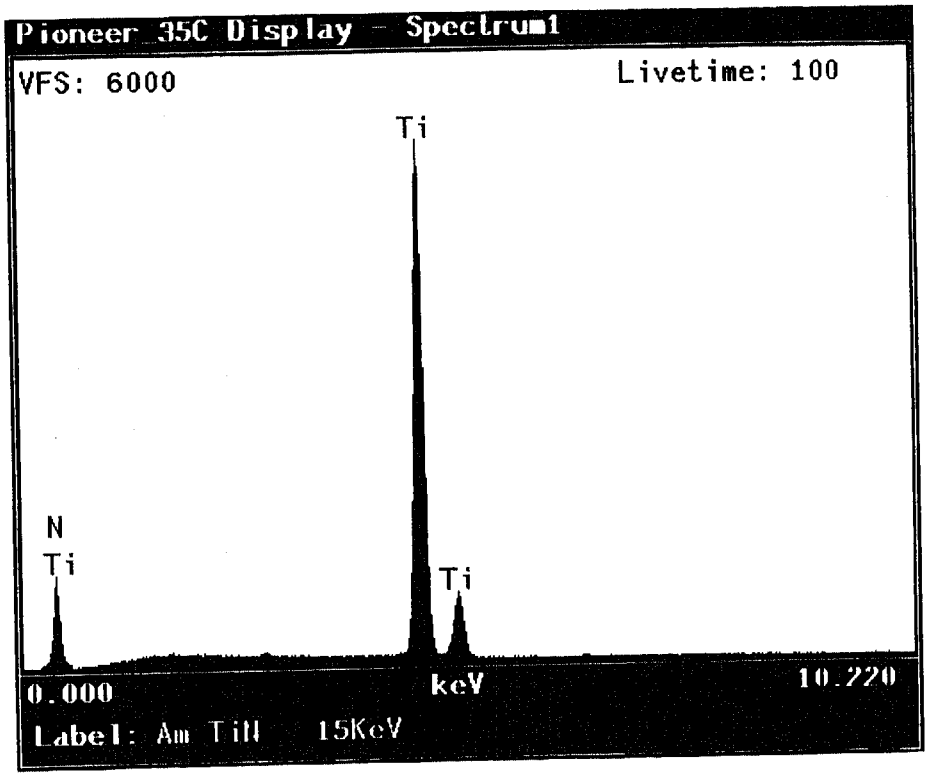


Figura 2.12 - Espectro da composição do revestimento de TiN, obtido por EDS

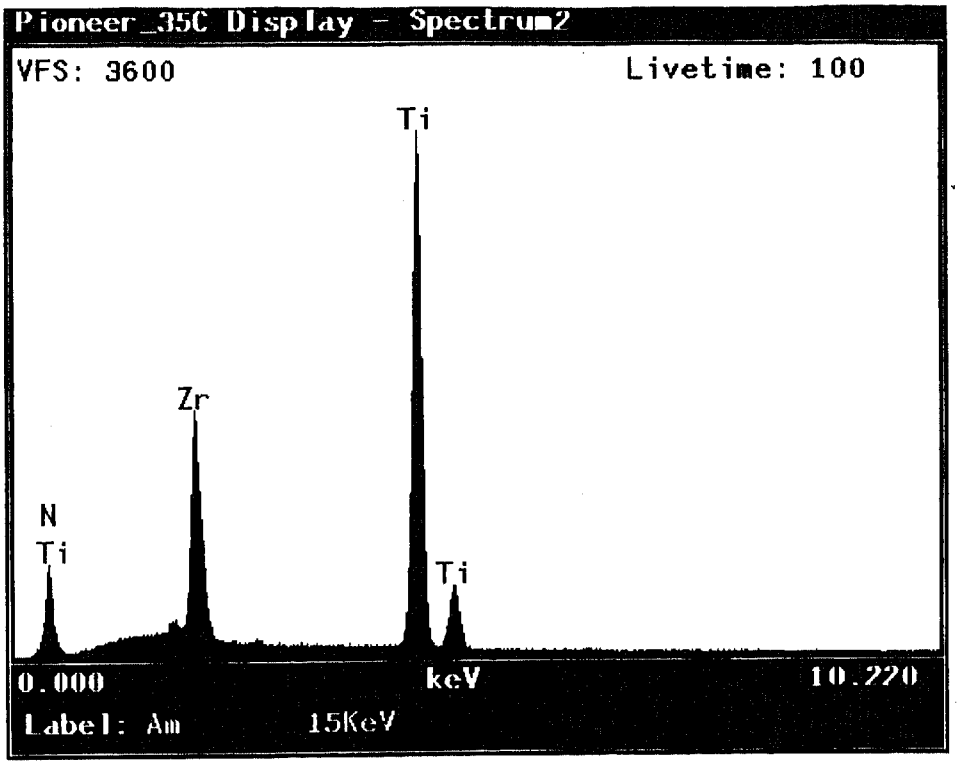


Figura 2.13 - Espectro da composição do revestimento de (Ti, Zr) N, obtido por EDS

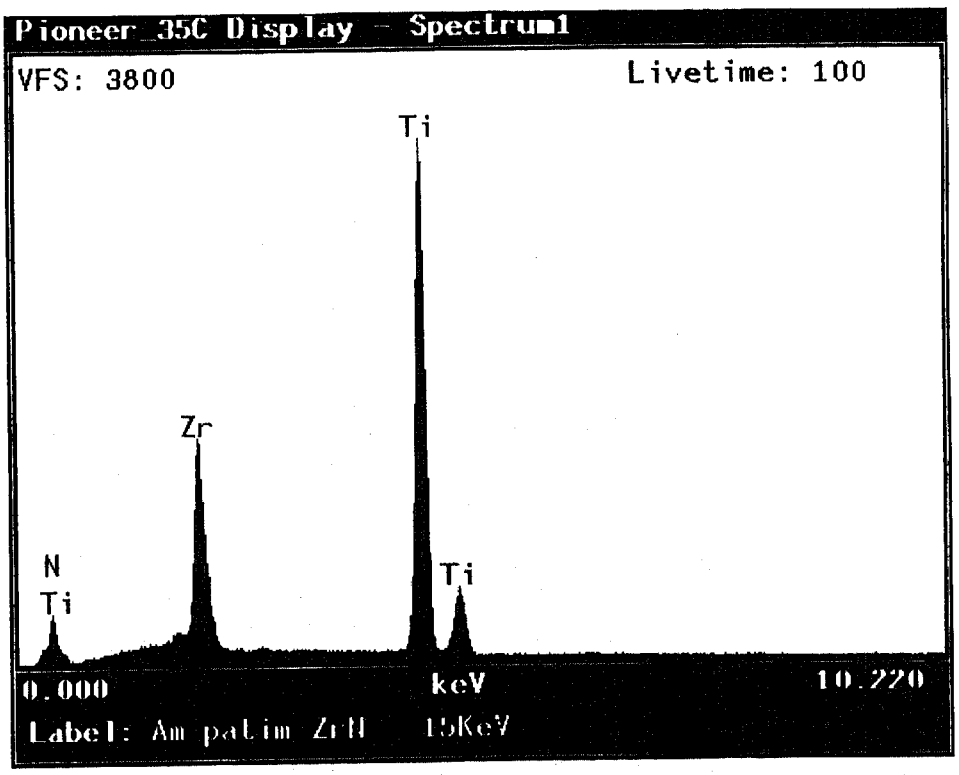


Figura 2.14 - Espectro da composição do revestimento de ZrN, obtido por EDS

Na análise da película de ZrN foi detectada a presença de quantidades significativas de titânio. A explicação para a presença de titanio na película prende-se com o facto de ter existido contaminação dos alvos de zircónio com titânio, quando da execução de revestimentos com liga de (Ti,Zr)N. Tal facto ficou a dever-se a uma limpeza pouco adequada da câmara após a deposição da liga de (Ti,Zr)N, e à falta de uma operação de rotina dos alvos, que consiste numa prévia limpeza dos alvos.Essa limpeza é efectuada através de uma falsa deposição sobre uma peça utilizada apenas para esse efeito, e que liberta o alvo da camada de material contaminado, através da sua deposição na peça referida. Após efectuada essa falsa deposição, a peça utilizada seria retirada para dar lugar às peças a serem revestidas efectivamente.

2.3.4 - Rugosidade

O estudo da rugosidade das superfícies foi realizado com um rugosímetro instalado no Cetrib. Os parâmetros seleccionados para a caracterização da superfície foram os seguintes:

- Rugosidade média aritmética, Ra
- Profundidade média da rugosidade, Rz
- Curva de Abott ou Curva da área de suporte

Para a caracterização das superfícies, foram efectuadas três medições sobre um patim e uma pista de cada tipo de superfície, efectuadas em locais diferentes, mas mantendo fixa a direcção transversal do movimento do apalpador. Os relatórios de cada ensaio encontram-se apresentados em anexo próprio. O resumo dos resultados é apresentado nos quadros seguintes:

C220	5.83	25.51
TiN	3.73	17.92
(Ti,Zr)N	2.81	14.97
ZrN	3.28	15.76

Quadro 2.1 - Quadro/Resumo dos resultados obtidos na caracterização da superfície dos patins

C220	0.663	4.76
TiN	0.663	6.19
(Ti,Zr)N	0.553	7.42
ZrN	0.733	7.703

Quadro 2.2 - Quadro/Resumo dos resultados obtidos na caracterização da superfície das pistas

Conforme poderá ser constatado por observação dos quadros anteriores, o revestimento provoca uma diminuição da rugosidade, quando esta é acentuada na superfície do substrato. Em superfícies rectificadas, como é o caso da superfície das pistas utilizadas nestes ensaios, a rugosidade mantém aproximadamente os mesmos valores.

2.3.5 - Dureza

A medição da dureza em superfícies com uma espessura tão baixa, só pode ser efectuada com cargas muito baixas, penetradores apropriados e meios ópticos mais sofisticados. Os penetradores disponíveis para este tipo de medição, normalmente designado por medição de microdurezas, podem ser de dois tipos: Vickers e Knoop. A escolha recaiu sobre um penetrador do tipo Vickers, por ser aquele que permite uma maior precisão de resultados, e por ser aquele que é referido com mais frequência na literatura consultada como método de avaliação da dureza de superfícies revestidas.

Os ensaios de microdurezas foram efectuados com uma carga de 25 gramas. Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Superfície do substrato (C220) com nitruração iónica: 920 HV $_{0.025}$
- Superfície revestida com TiN: 1960 HV $_{0.025}$
- Superfície revestida com ZrN: 2340 HV $_{0.025}$
- Superfície revestida com a liga (Ti,Zr)N: 2080 HV $_{0.025}$

A figura seguinte pretende ilustrar de forma gráfica a diferença existente entre a dureza do substrato e de qualquer um dos revestimentos utilizados.

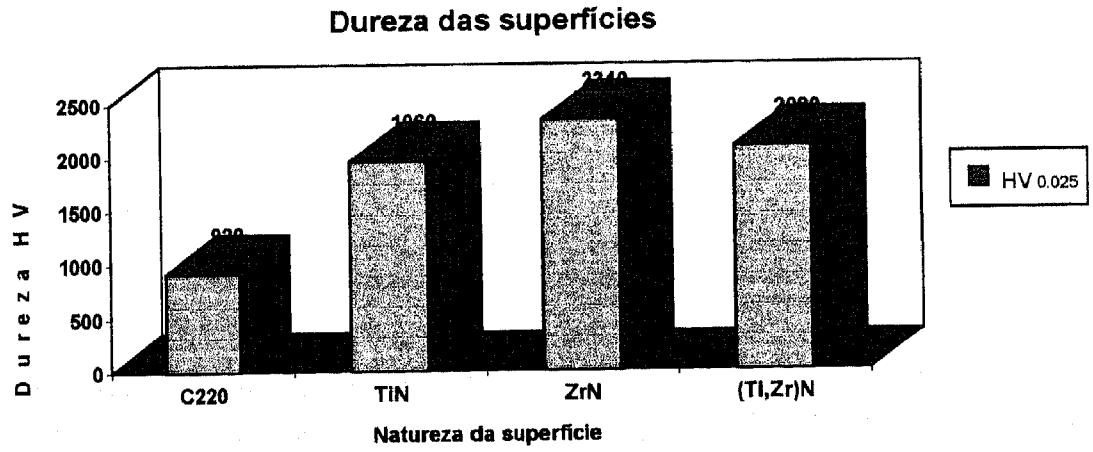


Figura 2.15 - Gráfico comparativo da dureza Vickers do substrato e das superfícies revestidas

2.4 - Selecção das condições de ensaio

A realização dos ensaios implicou a definição prévia do equipamento a utilizar, e dos parâmetros de ensaio mais adequados ao estudo a realizar.

2.4.1 - Configuração utilizada

Para a realização do trabalho experimental, foi escolhida uma configuração do tipo "patim em pista, por permitir a aplicação de maiores níveis de carga e velocidades de deslizamento elevadas. Sendo objectivo deste trabalho aproximar as condições de realização do estudo às situações concretas utilizadas na prática em órgãos de máquinas e outros equipamentos, só este tipo de configuração servia os propósitos do trabalho, por proporcionar a obtenção de um contacto conforme sujeito a uma velocidade de deslizamento relativamente elevada. A norma ISO 7148/1 regulamenta a realização deste tipo de ensaio.

As condições funcionais do contacto, proporcionadas pelo desenho dos provetes, foram as seguintes:

- Área de contacto: 251.3 mm^2
- Perímetro das pistas: 377 mm
- Comprimento total de deslizamento em cada ensaio: 754 m
- Pressão de contacto: 0.28 MPa

2.4.2 Carga

A escala de cargas oferecida pelo tribómetro é discreta, estando dependente dos disco que são colocados no respectivo prato de suporte. Sem qualquer carga no suporte, a máquina oferece uma carga de 70 N correspondente ao peso da estrutura de suporte dos patins e respectivas guias. Os discos disponíveis para acréscimos de carga no contacto, permitem uma carga adicional de 100 N por unidade.

Face às duas cargas mais baixas oferecidas pelo tribómetro -70 N e 170 N -, e perante o nível de rugosidade verificado nos patins, a opção recaiu sobre a carga de 70 N, por ser aquela que oferecia maior garantia de uniformidade na avaliação do desgaste das superfícies, não correr o risco de perfuração acentuada dos revestimentos. A carga de 70 N utilizada originou uma pressão de contacto de 0,28 MPa.

2.4.3 - Velocidade

Sendo objectivo deste trabalho impôr condições relativamente severas de contacto, a velocidade de deslizamento teria que ser compatível com esse objectivo. Por esse motivo, e porque se pretendia estudar a possível influência da velocidade de deslizamento no comportamento ao desgaste das superfícies revestidas, foram seleccionadas para velocidades de ensaio 1m/s e 3m/s.

A escolha recaiu ainda sobre estas velocidades pelo facto destes valores corresponderem aos níveis mínimo e máximo de desgaste obtido por Wang et al. (1996) em ensaios efectuados num tribómetro de Blouet, com superfícies revestidas a Cr_2O_3 por PVD. Não se tratando do mesmo tipo dos revestimentos utilizados neste trabalho, serviu no entanto como referência na selecção das velocidades de ensaio.

2.4.4 - Lubrificante

Para a realização dos ensaios com contacto lubrificado, foi escolhido como lubrificante um óleo base ISO VG 220. A escolha recaiu sobre este lubrificante pelo facto deste óleo possuir uma viscosidade média, e ser de uso bastante frequente em órgãos de máquinas, tais como chumaceiras e outros.

2.5 - Plano de ensaios

Conforme foi referido anteriormente, o nível de rugosidade dos patins era significativamente mais elevado do que a rugosidade das pistas, por força do tipo de maquinagem a que foram sujeitos. Para que todos os revestimentos pudessem ser estudados em igualdade de circunstâncias, foi necessário proceder a quinze ensaios, correspondentes à combinação entre todas as superfícies que se pretendiam estudar, e excluindo o contacto substrato - substrato, por não fazer parte dos objectivos do trabalho.

Sendo objectivo do trabalho estudar a diferença de comportamento das superfícies com duas velocidades de deslizamento diferentes, tornou-se necessário proceder à duplicação do número de ensaios.

Fazendo parte dos objectivos do trabalho estudar o comportamento das superfícies em condições de contacto seco e lubrificado, foi ainda necessário proceder a nova duplicação dos ensaios.

Com base no exposto, a realização deste trabalho implicou a realização de sessenta ensaios, tendo sido estabelecido o limite de dois mil ciclos por ensaio. Este limite foi estabelecido com base em ensaios prévios. Um número superior de ciclos poderia provocar uma rotura mais acentuada do revestimento, ficando o contacto a efectuar-se entre uma superfície e o substrato da oposta, o que conduziria a um erro na análise a efectuar.

O plano completo de ensaios é apresentado nos quadros seguintes.

PLANO DE ENSAIOS (não lubrificados)

Nº do Ensaio	Nº do Provete	Revestimento		Velocidade		Carga (N)	Lubrificação
		Pista	Patim	RPM	m/s		
1	1	C220	TiN	159	1	70	N
2	1	C220	TiN	478	3	70	N
3	2	C220	ZrN	159	1	70	N
4	2	C220	ZrN	478	3	70	N
5	3	C220	(TiZr)N	159	1	70	N
6	3	C220	(TiZr)N	478	3	70	N
7	4	TiN	TiN	159	1	70	N
8	4	TiN	TiN	478	3	70	N
9	5	TiN	ZrN	159	1	70	N
10	5	TiN	ZrN	478	3	70	N
11	6	TiN	(TiZr)N	159	1	70	N
12	6	TiN	(TiZr)N	478	3	70	N
13	7	TiN	C220	159	1	70	N
14	7	TiN	C220	478	3	70	N
15	8	ZrN	TiN	159	1	70	N
16	8	ZrN	TiN	478	3	70	N
17	9	ZrN	ZrN	159	1	70	N
18	9	ZrN	ZrN	478	3	70	N
19	10	ZrN	(TiZr)N	159	1	70	N
20	10	ZrN	(TiZr)N	478	3	70	N
21	11	ZrN	C220	159	1	70	N
22	11	ZrN	C220	478	3	70	N
23	12	(TiZr)N	TiN	159	1	70	N
24	12	(TiZr)N	TiN	478	3	70	N
25	13	(TiZr)N	ZrN	159	1	70	N
26	13	(TiZr)N	ZrN	478	3	70	N
27	14	(TiZr)N	(TiZr)N	159	1	70	N
28	14	(TiZr)N	(TiZr)N	478	3	70	N
29	15	(TiZr)N	C220	159	1	70	N
30	15	(TiZr)N	C220	478	3	70	N

Quadro 2.3 - Plano de ensaios (não lubrificados)

PLANO DE ENSAIOS (Lubrificados)

Nº do Ensaio	Nº do Provete	Revestimento		Velocidade		Carga	Lubrificação
		Pista	Patim	RPM	m/s	(N)	
31	31	C220	TiN	159	1	70	S
32	32	C220	TiN	478	3	70	S
33	33	C220	ZrN	159	1	70	S
34	34	C220	ZrN	478	3	70	S
35	35	C220	(TiZr)N	159	1	70	S
36	36	C220	(TiZr)N	478	3	70	S
37	37	TiN	TiN	159	1	70	S
38	38	TiN	TiN	478	3	70	S
39	39	TiN	ZrN	159	1	70	S
40	40	TiN	ZrN	478	3	70	S
41	41	TiN	(TiZr)N	159	1	70	S
42	42	TiN	(TiZr)N	478	3	70	S
43	43	TiN	C220	159	1	70	S
44	44	TiN	C220	478	3	70	S
45	45	ZrN	TiN	159	1	70	S
46	46	ZrN	TiN	478	3	70	S
47	47	ZrN	ZrN	159	1	70	S
48	48	ZrN	ZrN	478	3	70	S
49	49	ZrN	(TiZr)N	159	1	70	S
50	50	ZrN	(TiZr)N	478	3	70	S
51	51	ZrN	C220	159	1	70	S
52	52	ZrN	C220	478	3	70	S
53	53	(TiZr)N	TiN	159	1	70	S
54	54	(TiZr)N	TiN	478	3	70	S
55	55	(TiZr)N	ZrN	159	1	70	S
56	56	(TiZr)N	ZrN	478	3	70	S
57	57	(TiZr)N	(TiZr)N	159	1	70	S
58	58	(TiZr)N	(TiZr)N	478	3	70	S
59	59	(TiZr)N	C220	159	1	70	S
60	60	(TiZr)N	C220	478	3	70	S

Quadro 2.4 - Plano de ensaios (lubrificados)

2.6 - Selecção das variáveis a controlar

A realização do trabalho experimental teve por objectivo recolher o maior número de dados possível sobre a taxa e mecanismos de desgaste ocorridos em cada situação de contacto.

Atendendo ao equipamento de controlo e registo disponível, procedeu-se à análise dos seguintes parâmetros:

- Massa perdida pelo patim
- Força de atrito inicial, e sua evolução ao longo do ensaio
- Morfologia da superfície após o ensaio
- Análise da composição local

A quantificação da massa perdida por cada patim foi efectuada com recurso a uma balança Mettler H31AR, com resolução de uma décima de miligrama. Foram efectuadas três pesagens de cada patim antes e após cada ensaio. Foi adoptado o valor médio das três pesagens efectuadas.

A força de atrito foi quantificada através da deformação dos extensómetros colocados no tribómetro para o efeito. O sinal eléctrico enviado pelos extensómetros, após tratamento em instrumentação adequada (ponte de Wheatstone), era enviado a um multímetro Fluke 45 para controlo, e a uma placa de aquisição de dados, que permitia o tratamento informático do sinal recebido, através do *software* Labview 4.0 instalado no computador de apoio. O programa permitia observar graficamente a variação da força de atrito, e registar os dados sob a forma de ficheiro compatível com o tratamento como folha de cálculo tipo Excel.

Utilizando a tecnologia SEM, foi efectuado um registo fotográfico da morfologia das várias superfícies que suscitaram maiores dúvidas na sua análise. Para as restantes superfícies, foi utilizado um microscópio óptico Zeiss Axiophot, com ampliações de 50 e 100 vezes, para observação e registo fotográfico do sua morfologia após ensaio.

Nas superfícies analisadas por SEM, foi efectuada uma observação atenta das roturas de revestimento e das transferências de material ocorridas durante o ensaio, bem como a formação de placas de óxidos nas superfícies. Nestas zonas, foi efectuada uma análise EDS que permitiu averiguar a composição local.

2.7 - Apresentação e análise dos resultados

Nas páginas seguintes poderão ser encontrados os quadros que sintetizam os resultados obtidos, bem como vários gráficos que pretendem ilustrar de forma mais perceptível os resultados, permitindo uma rápida comparação entre os resultados obtidos, nas várias condições de ensaio impostas. Num anexo deste trabalho, poderão ser encontrados todos os

relatórios de ensaio efectuados, onde poderá ser observada graficamente a evolução do coeficiente de atrito ao longo do ensaio.

QUADRO/RESUMO DE RESULTADOS

Nº do Ensaio	Nº do Provete	Revestimento		Velocidade		Carga (N)	Lubrificação	μ inicial	Variação de μ	Perda de massa do patim (mg)
		Pista	Patim	RPM	m/s					
1	1	C220	TiN	159	1	70	N	0,5857	0,0757	1,5
2	1	C220	TiN	478	3	70	N	0,6285	0,1	2
3	2	C220	ZrN	159	1	70	N	0,5429	0,0585	2,2
4	2	C220	ZrN	478	3	70	N	0,5857	0,0743	2,9
5	3	C220	(TiZr)N	159	1	70	N	0,6	0,0214	1,5
6	3	C220	(TiZr)N	478	3	70	N	0,6429	0,0215	2,3
7	4	TiN	TiN	159	1	70	N	0,4857	0,0085	1,8
8	4	TiN	TiN	478	3	70	N	0,5143	0,0214	2,2
9	5	TiN	ZrN	159	1	70	N	0,5286	0,0642	3,2
10	5	TiN	ZrN	478	3	70	N	0,5714	0,0572	3,9
11	6	TiN	(TiZr)N	159	1	70	N	0,5071	0,0143	2,1
12	6	TiN	(TiZr)N	478	3	70	N	0,5571	0,0215	2,5
13	7	TiN	C220	159	1	70	N	0,6	0,1429	13,7
14	7	TiN	C220	478	3	70	N	0,6571	0,1	14,8
15	8	ZrN	TiN	159	1	70	N	0,4928	0,0385	1,7
16	8	ZrN	TiN	478	3	70	N	0,5285	0,0356	2,1
17	9	ZrN	ZrN	159	1	70	N	0,5429	0,0571	2,6
18	9	ZrN	ZrN	478	3	70	N	0,6214	0,0643	2,9
19	10	ZrN	(TiZr)N	159	1	70	N	0,5643	0,0286	2
20	10	ZrN	(TiZr)N	478	3	70	N	0,5857	0,0428	2,5
21	11	ZrN	C220	159	1	70	N	0,6143	0,1142	12,8
22	11	ZrN	C220	478	3	70	N	0,6857	0,1143	15
23	12	(TiZr)N	TiN	159	1	70	N	0,4714	0,0286	1,6
24	12	(TiZr)N	TiN	478	3	70	N	0,5643	0,0428	2,1
25	13	(TiZr)N	ZrN	159	1	70	N	0,5571	0,05	3
26	13	(TiZr)N	ZrN	478	3	70	N	0,5929	0,0643	3,5
27	14	(TiZr)N	(TiZr)N	159	1	70	N	0,5	0,0271	1,9
28	14	(TiZr)N	(TiZr)N	478	3	70	N	0,5786	0,0372	2,4
29	15	(TiZr)N	C220	159	1	70	N	0,6142	0,1187	11,8
30	15	(TiZr)N	C220	478	3	70	N	0,6786	0,1285	13,4

Quadro 2.5 - Quadro/resumo de resultados dos ensaios não lubrificados

QUADRO/RESUMO DE RESULTADOS

Nº do Ensaio	Nº do Provete	Revestimento		Velocidade		Carga (N)	Lubrificação	μ inicial	Variação de μ	Perda de massa do patim (mg)
		Pista	Patim	RPM	m/s					
31	31	C220	TiN	159	1	70	S	0,3143	0,0714	0,4
32	32	C220	TiN	478	3	70	S	0,4	0,0929	0,5
33	33	C220	ZrN	159	1	70	S	0,2571	0,0572	0,7
34	34	C220	ZrN	478	3	70	S	0,3643	0,0615	0,9
35	35	C220	(TiZr)N	159	1	70	S	0,3	0,0214	0,5
36	36	C220	(TiZr)N	478	3	70	S	0,3429	0,0171	0,7
37	37	TiN	TiN	159	1	70	S	0,0,1429	0,0072	0,6
38	38	TiN	TiN	478	3	70	S	0,3571	0,01	0,9
39	39	TiN	ZrN	159	1	70	S	0,1714	0,0286	0,9
40	40	TiN	ZrN	478	3	70	S	0,3429	0,0571	1,3
41	41	TiN	(TiZr)N	159	1	70	S	0,2143	0,0114	0,6
42	42	TiN	(TiZr)N	478	3	70	S	0,3429	0,0214	0,9
43	43	TiN	C220	159	1	70	S	0,2429	0,1	2,2
44	44	TiN	C220	478	3	70	S	0,3714	0,0929	3,4
45	45	ZrN	TiN	159	1	70	S	0,2	0,0357	0,4
46	46	ZrN	TiN	478	3	70	S	0,35	0,0357	0,7
47	47	ZrN	ZrN	159	1	70	S	0,1529	0,0328	0,8
48	48	ZrN	ZrN	478	3	70	S	0,3857	0,0357	1,1
49	49	ZrN	(TiZr)N	159	1	70	S	0,2286	0,0144	0,5
50	50	ZrN	(TiZr)N	478	3	70	S	0,4071	0,0186	0,9
51	51	ZrN	C220	159	1	70	S	0,2214	0,1072	2,1
52	52	ZrN	C220	478	3	70	S	0,4643	0,1215	3,2
53	53	(TiZr)N	TiN	159	1	70	S	0,1571	0,0143	0,5
54	54	(TiZr)N	TiN	478	3	70	S	0,3786	0,0185	0,8
55	55	(TiZr)N	ZrN	159	1	70	S	0,2	0,04	0,6
56	56	(TiZr)N	ZrN	478	3	70	S	0,3714	0,05	1,3
57	57	(TiZr)N	(TiZr)N	159	1	70	S	0,1243	0,0257	0,6
58	58	(TiZr)N	(TiZr)N	478	3	70	S	0,3	0,0357	0,8
59	59	(TiZr)N	C220	159	1	70	S	0,2	0,1142	2,3
60	60	(TiZr)N	C220	478	3	70	S	0,35	0,1214	2,9

Quadro 2.6 - Quadro/resumo de resultados dos ensaios lubrificados

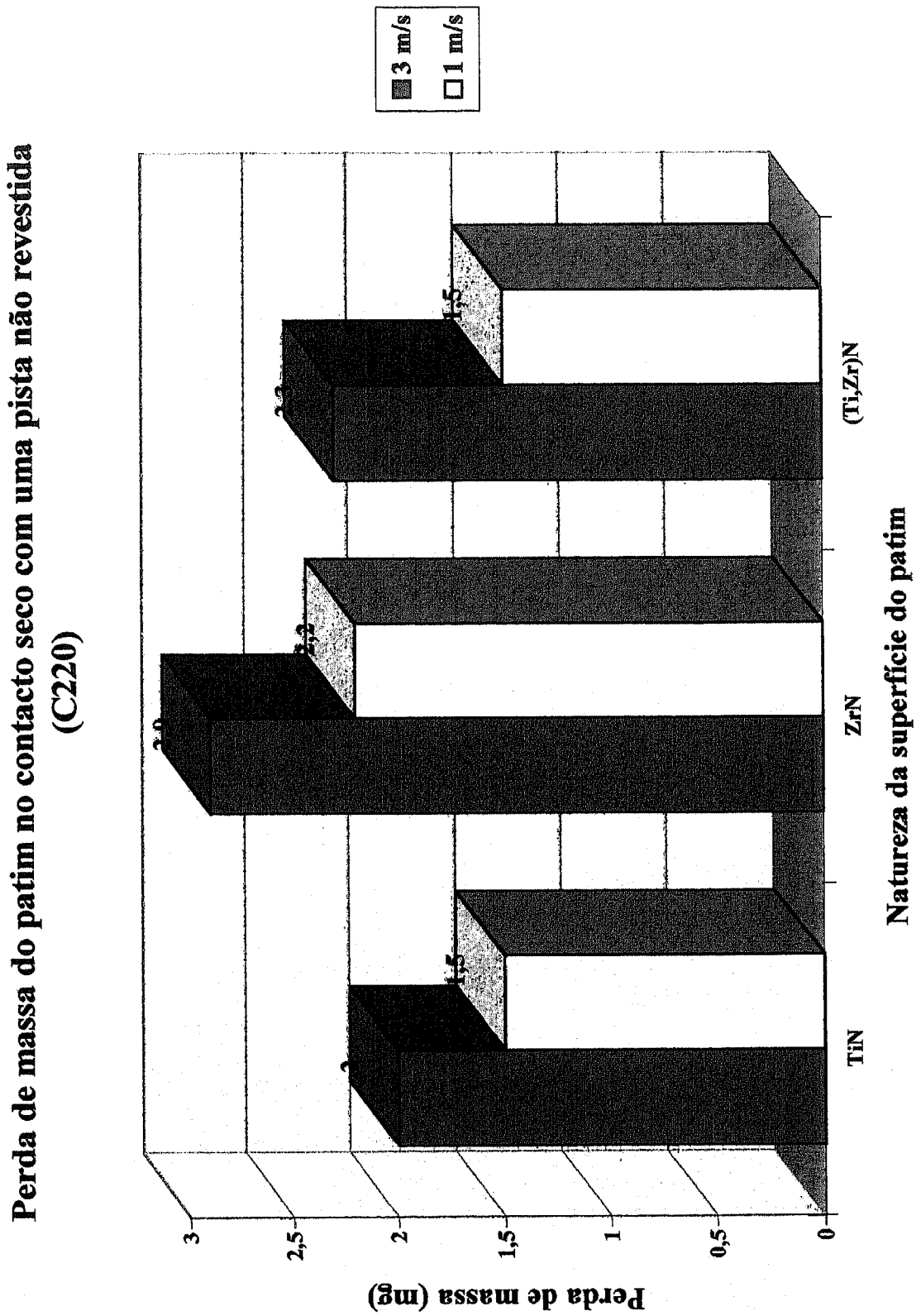


Figura 2.16 - Gráfico da perda de massa do patim no contacto seco com uma pista não revestida (C220)

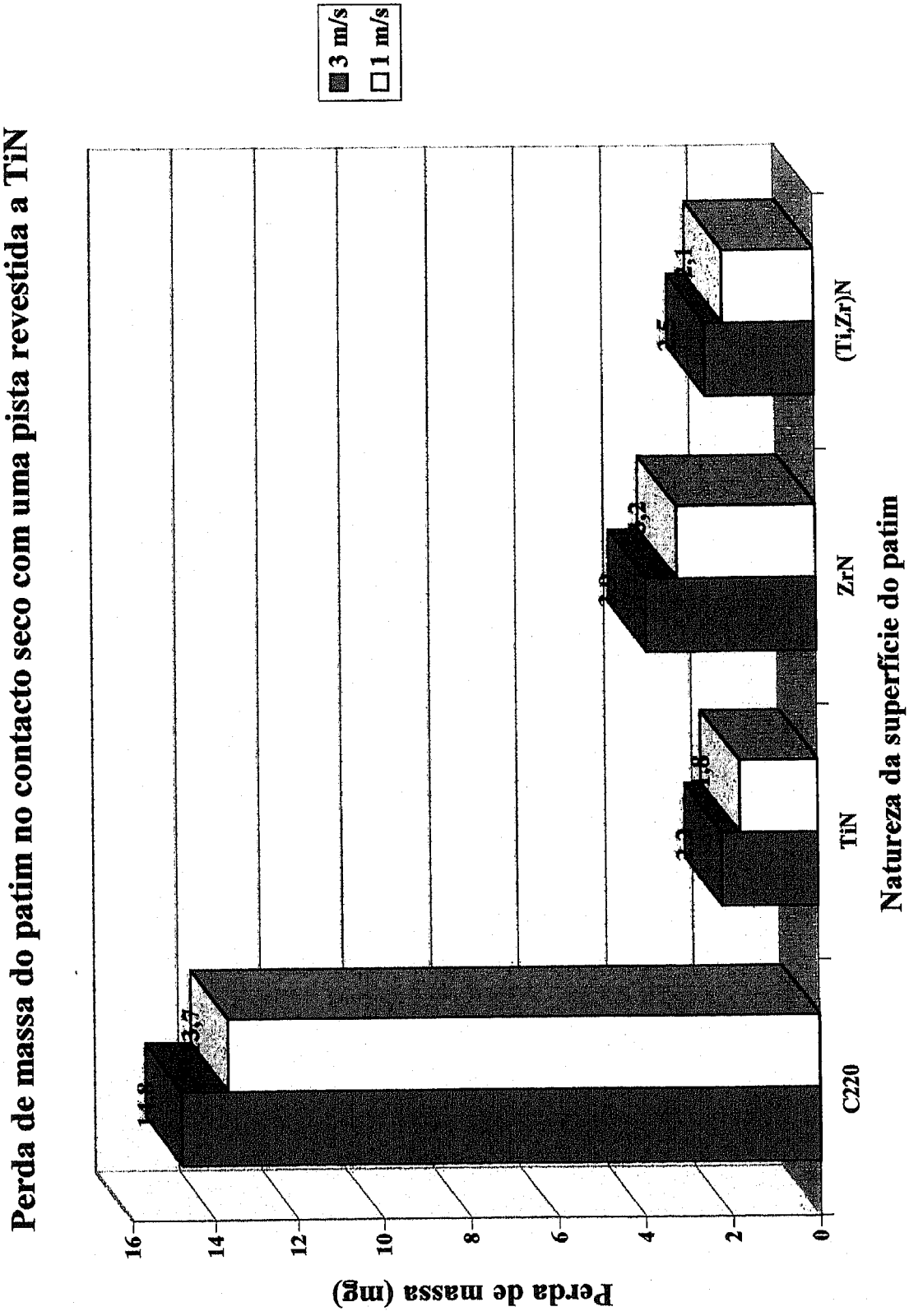


Figura 2.17 - Gráfico da perda de massa do patim no contacto seco com uma pista revestida a TiN

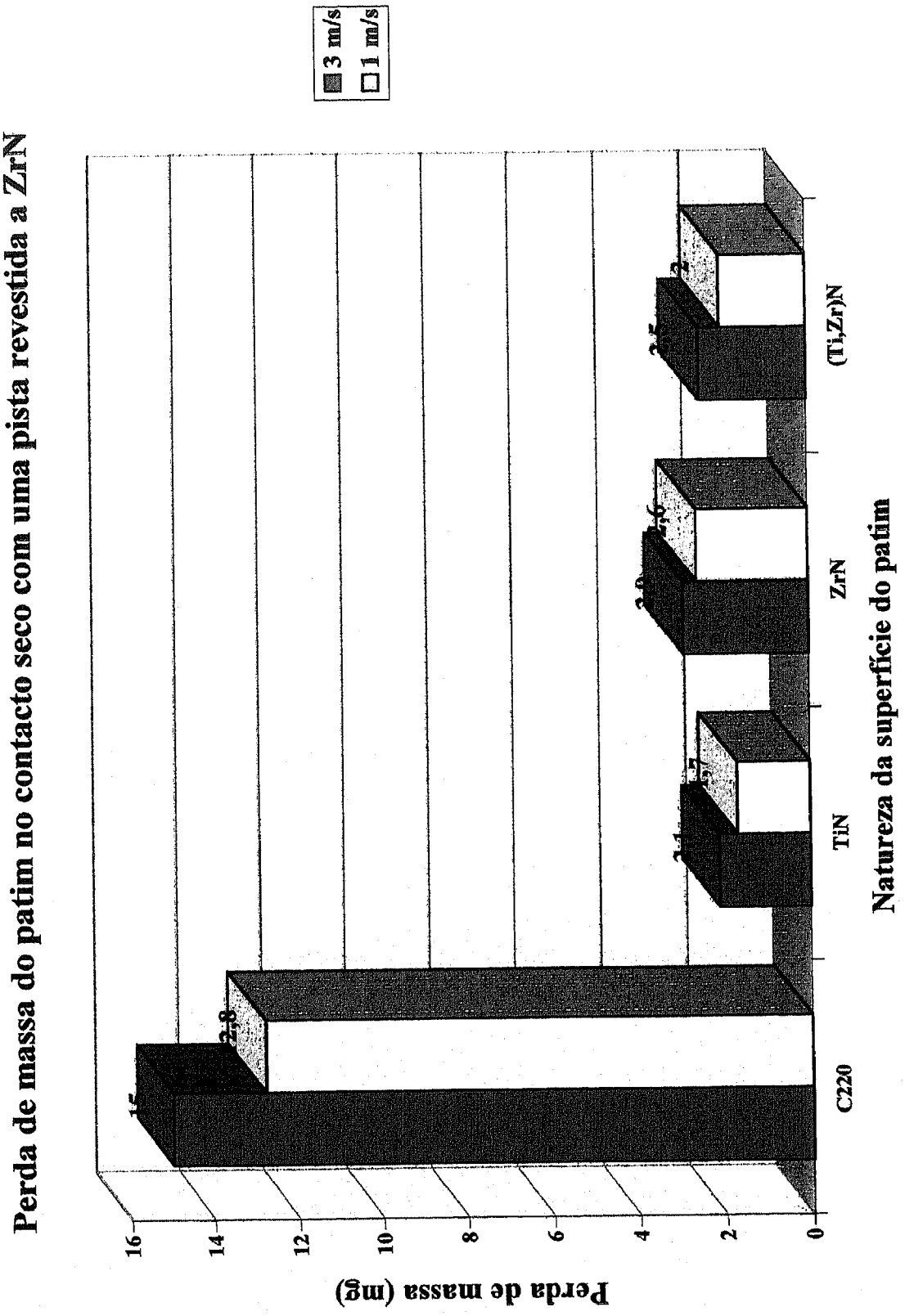


Figura 2.18 - Gráfico da perda de massa do patim no contacto seco com uma pista revestida a ZrN

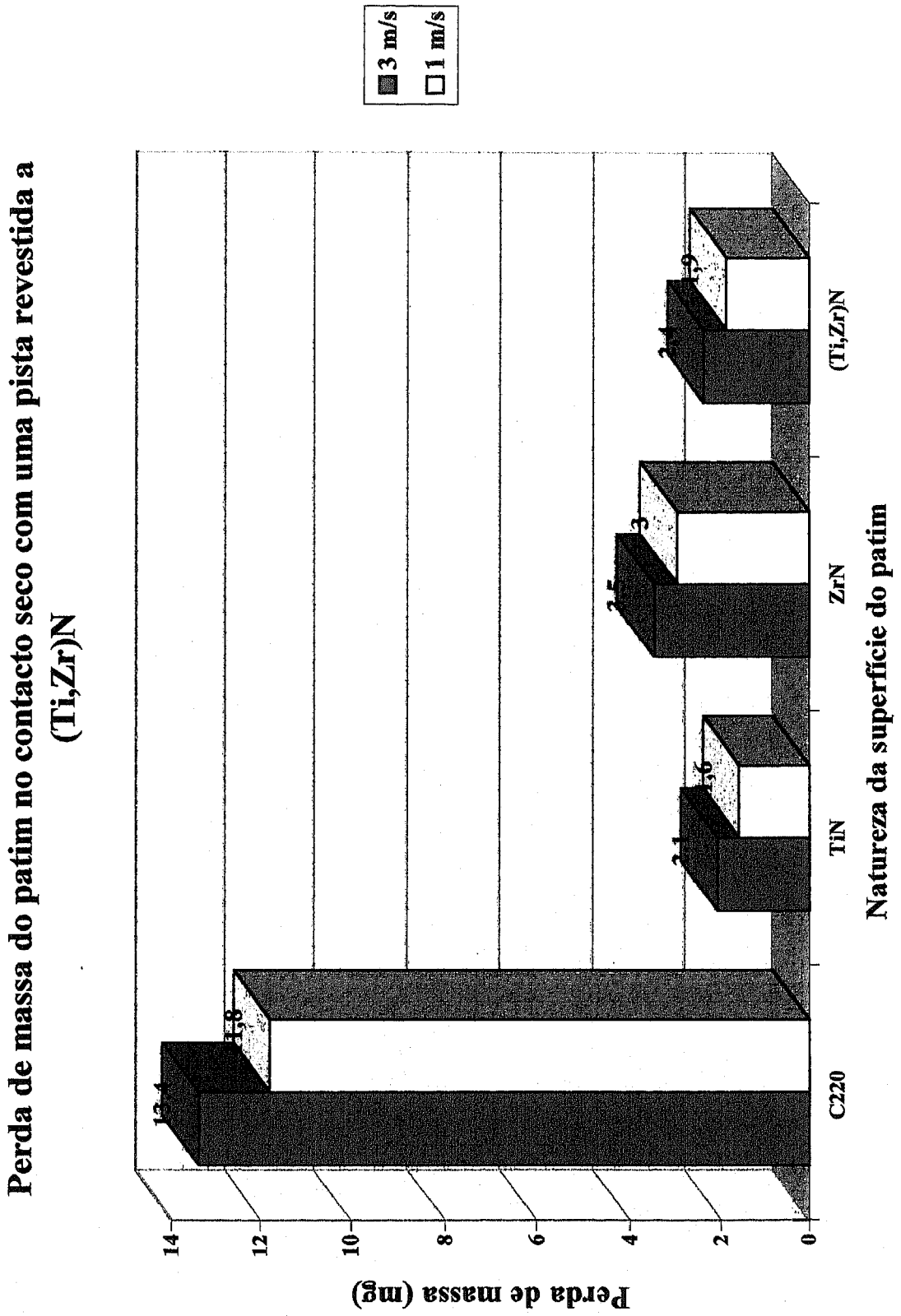


Figura 2.19 - Gráfico da perda de massa do patim no contacto seco com uma pista revestida a (Ti, Zr)N

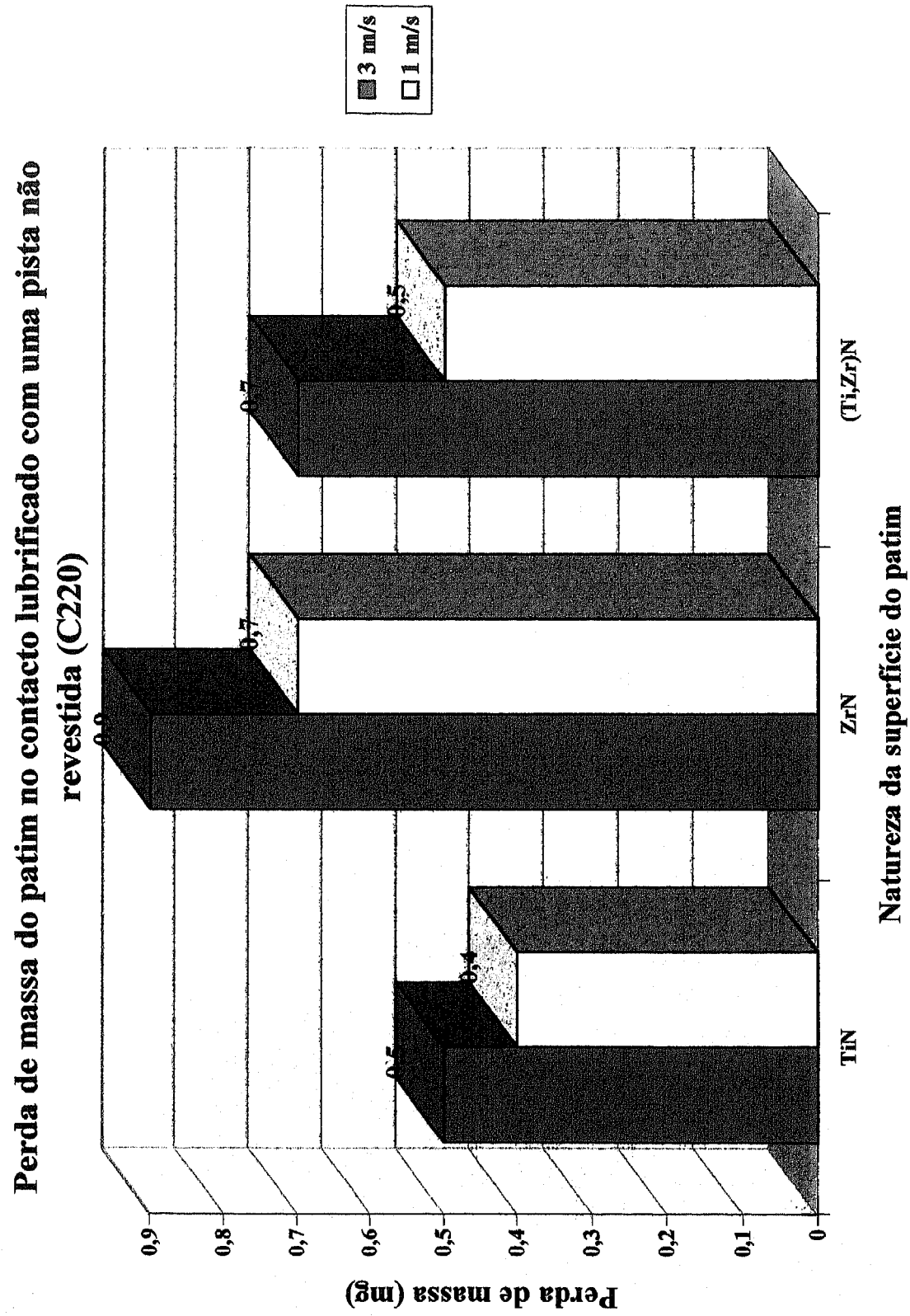


Figura 2.20 - Gráfico da perda de massa no contacto lubrificado com uma pista não revestida (C220)

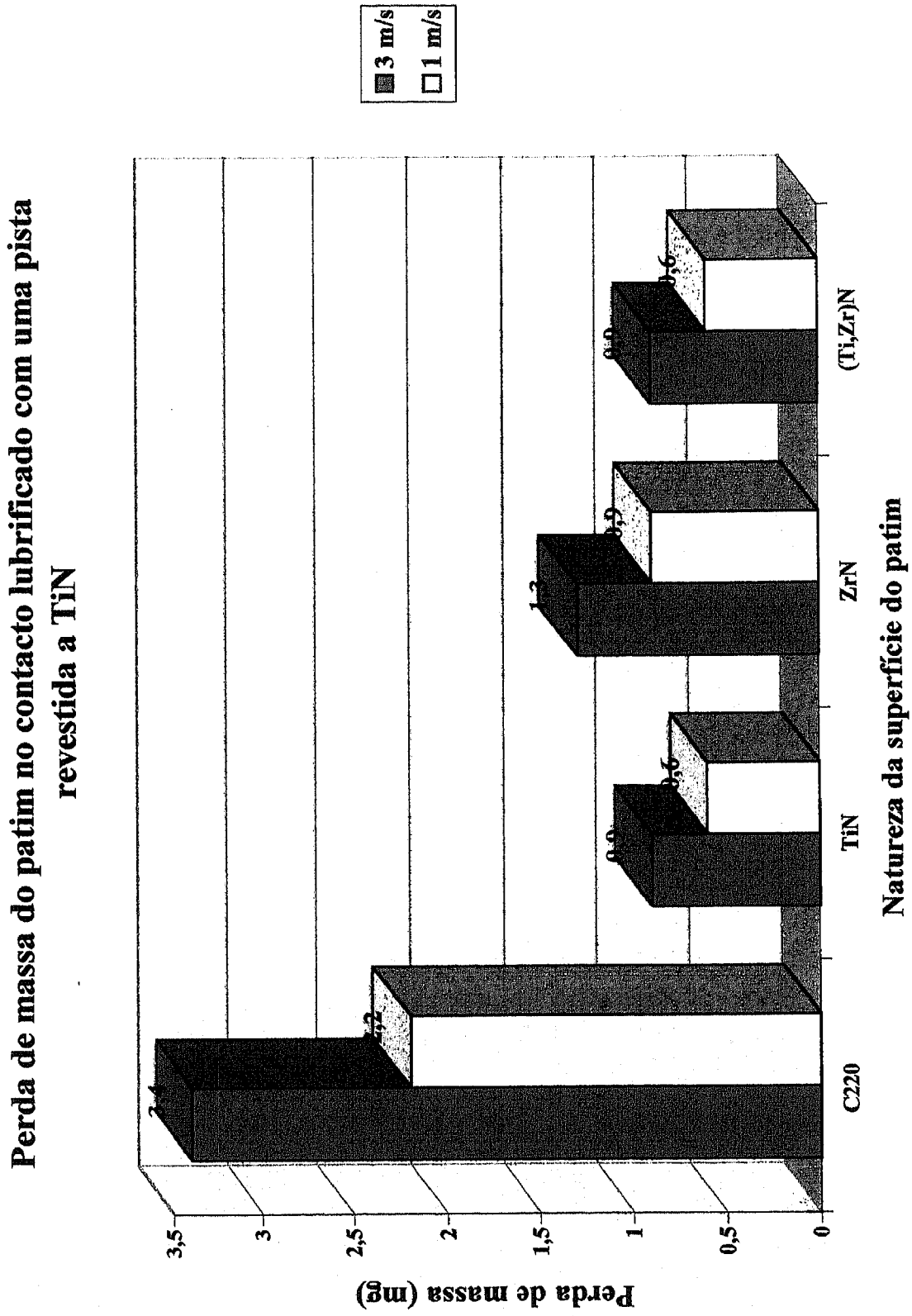


Figura 2.21 - Gráfico da perda de massa no contacto lubrificado com uma pista revestida a TiN

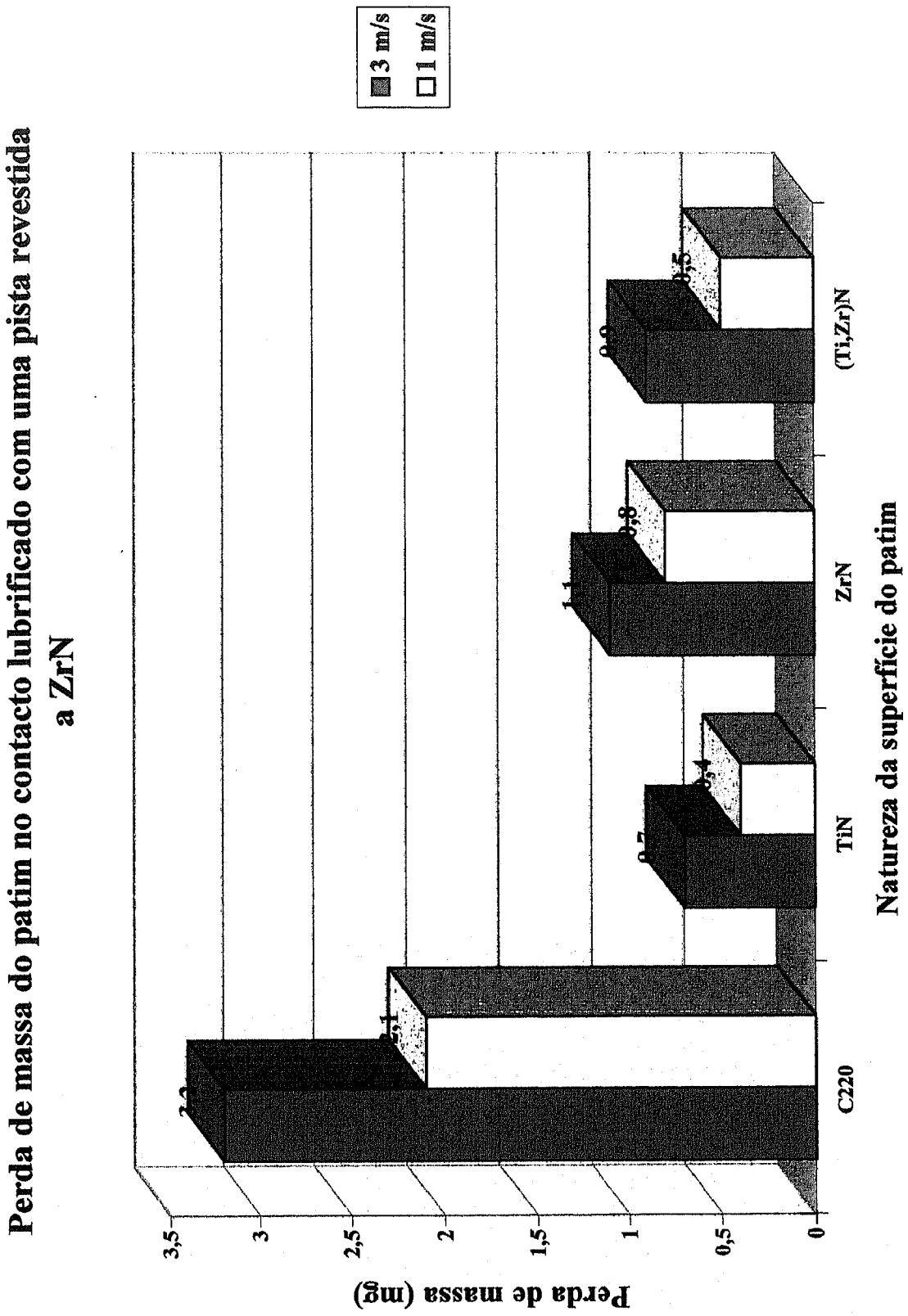


Figura 2.22 - Gráfico da perda de massa no contacto lubrificado com uma pista revestida a ZrN

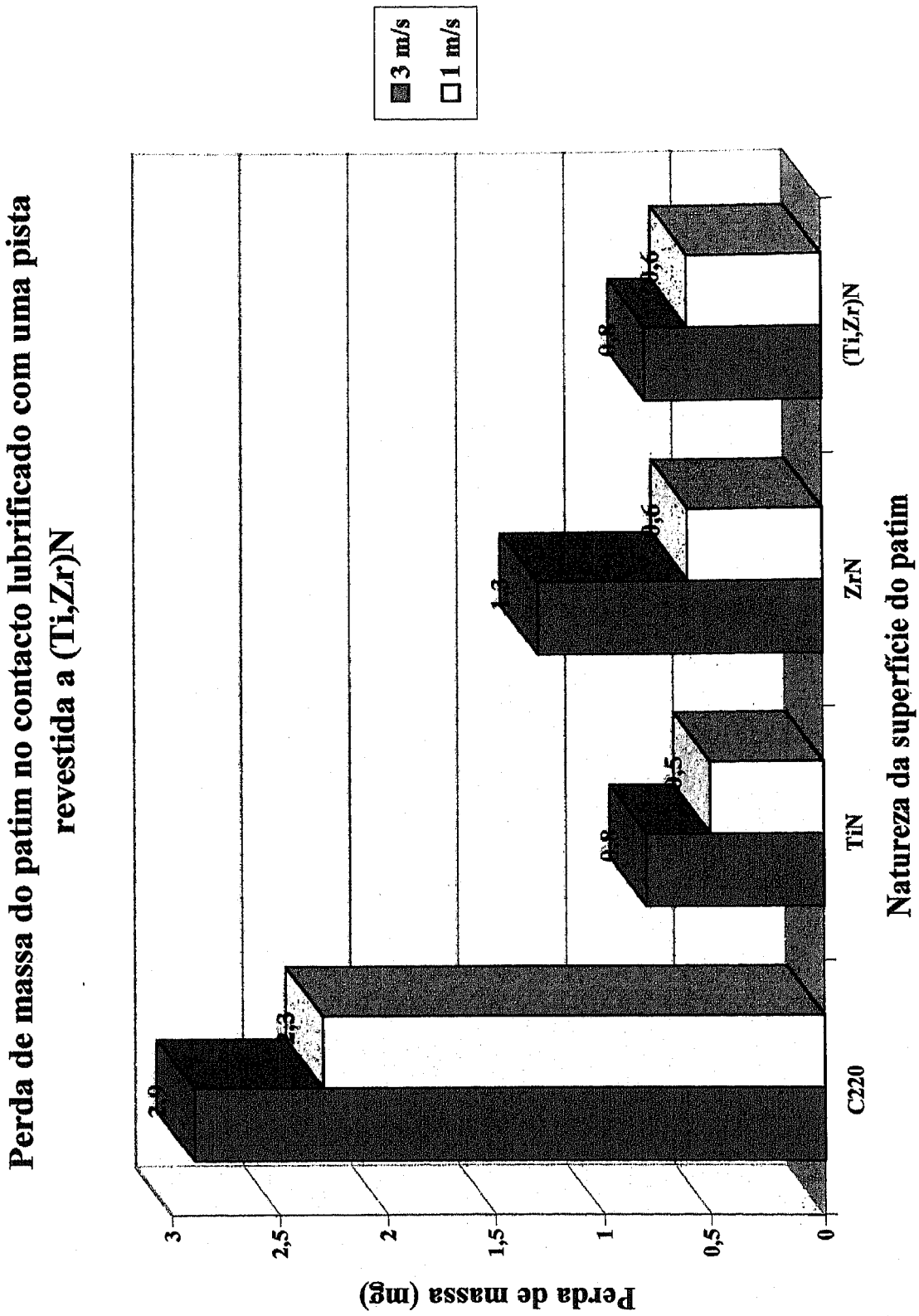


Figura 2.23 - Gráfico da perda de massa no contacto lubrificado com uma pista revestida a (Ti, Zr)N

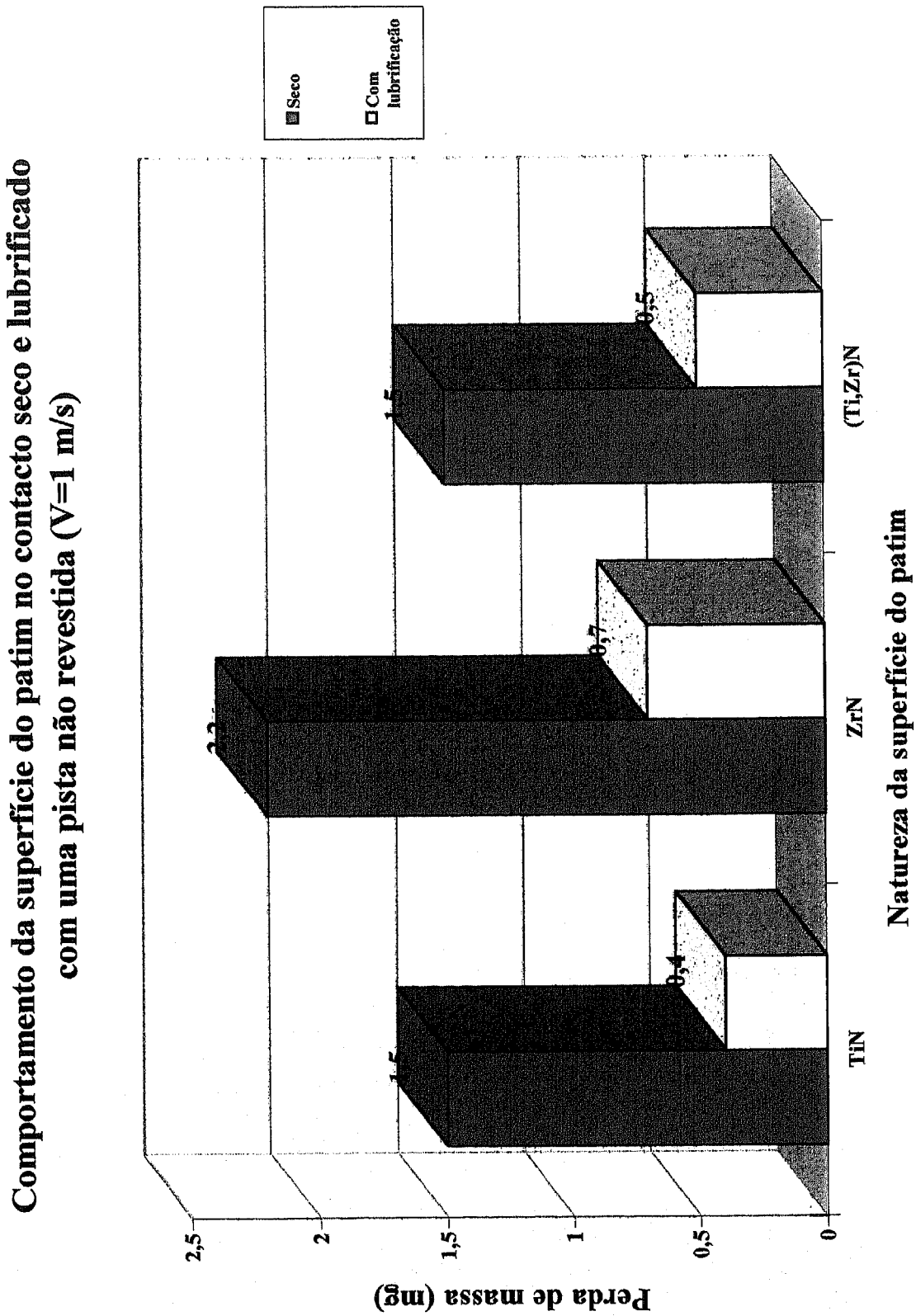


Figura 2.24 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista não revestida (V= 1m/s)

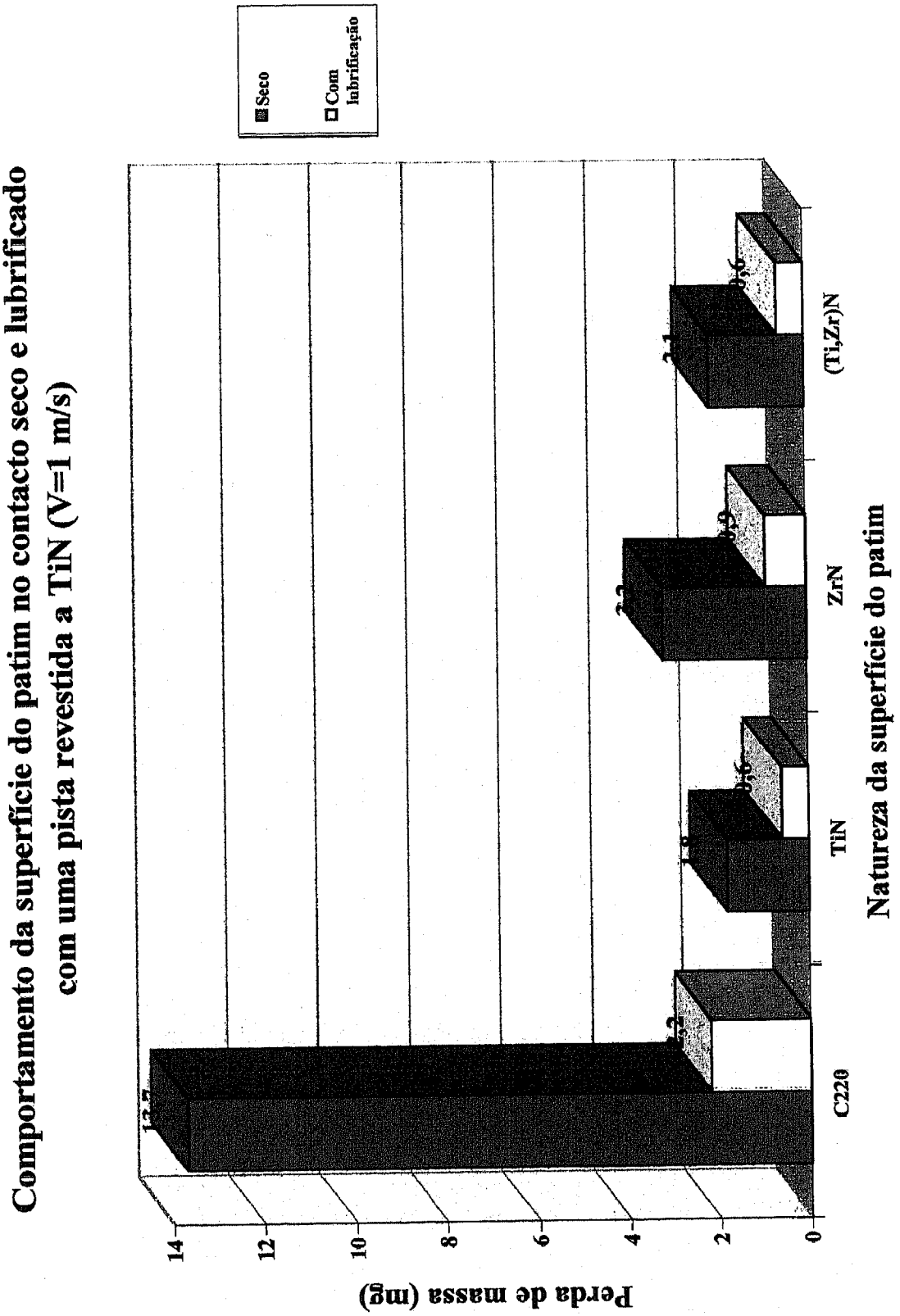


Figura 2.25 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista revestida a TiN (V= 1m/s)

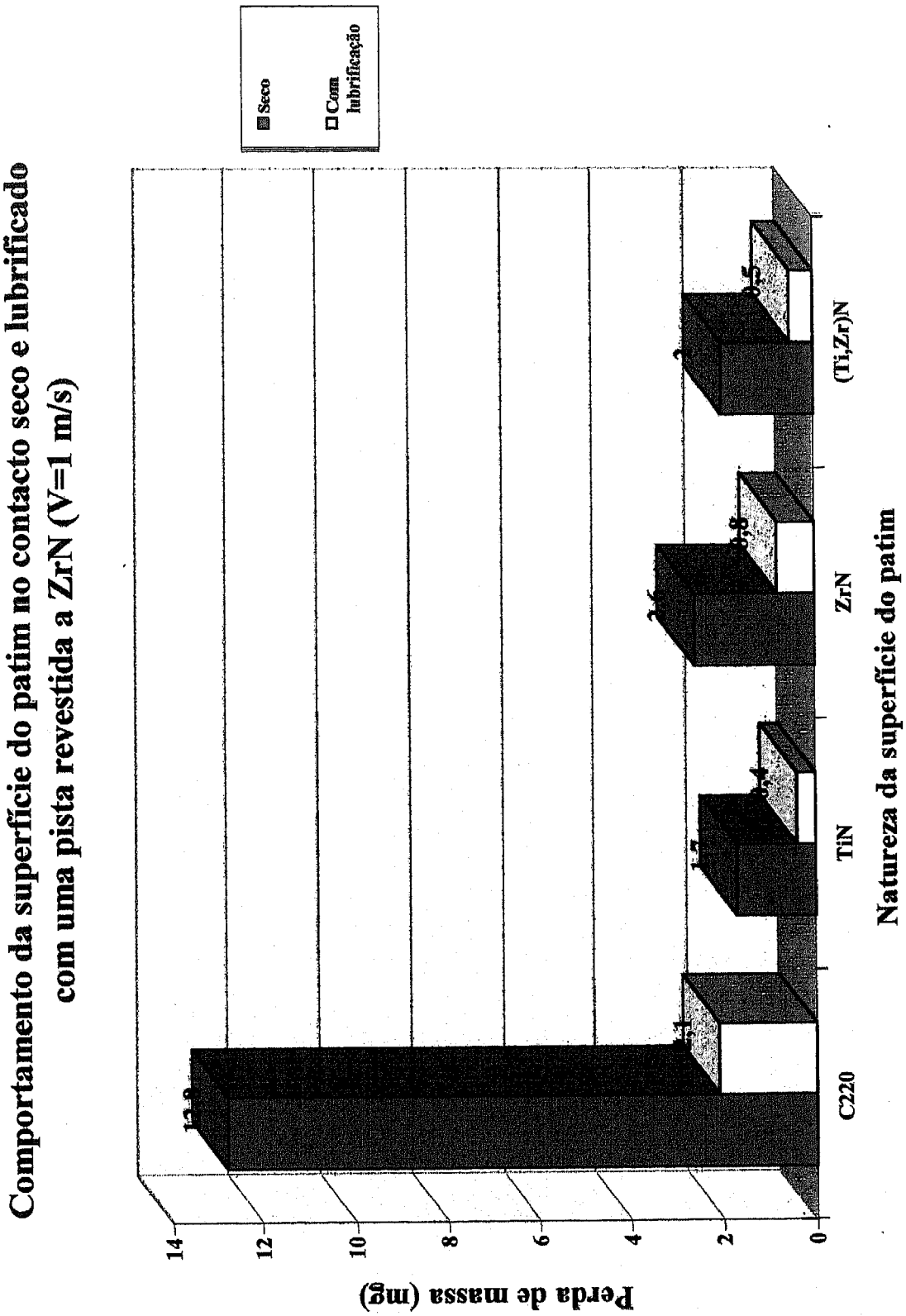


Figura 2.26 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista revestida a ZrN (V= 1m/s)

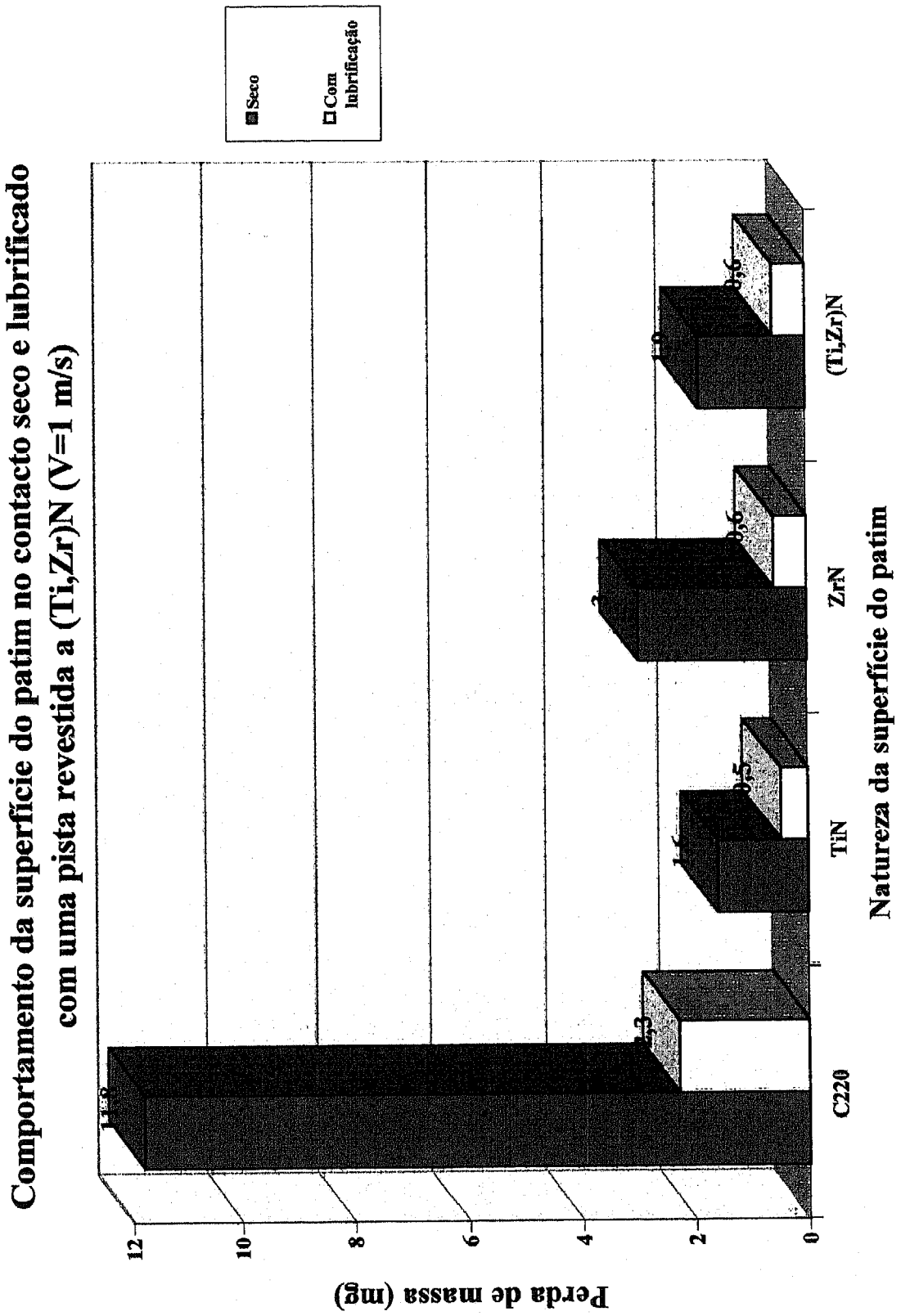


Figura 2.27 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista revestida a (Ti,Zr)N (V= 1m/s)

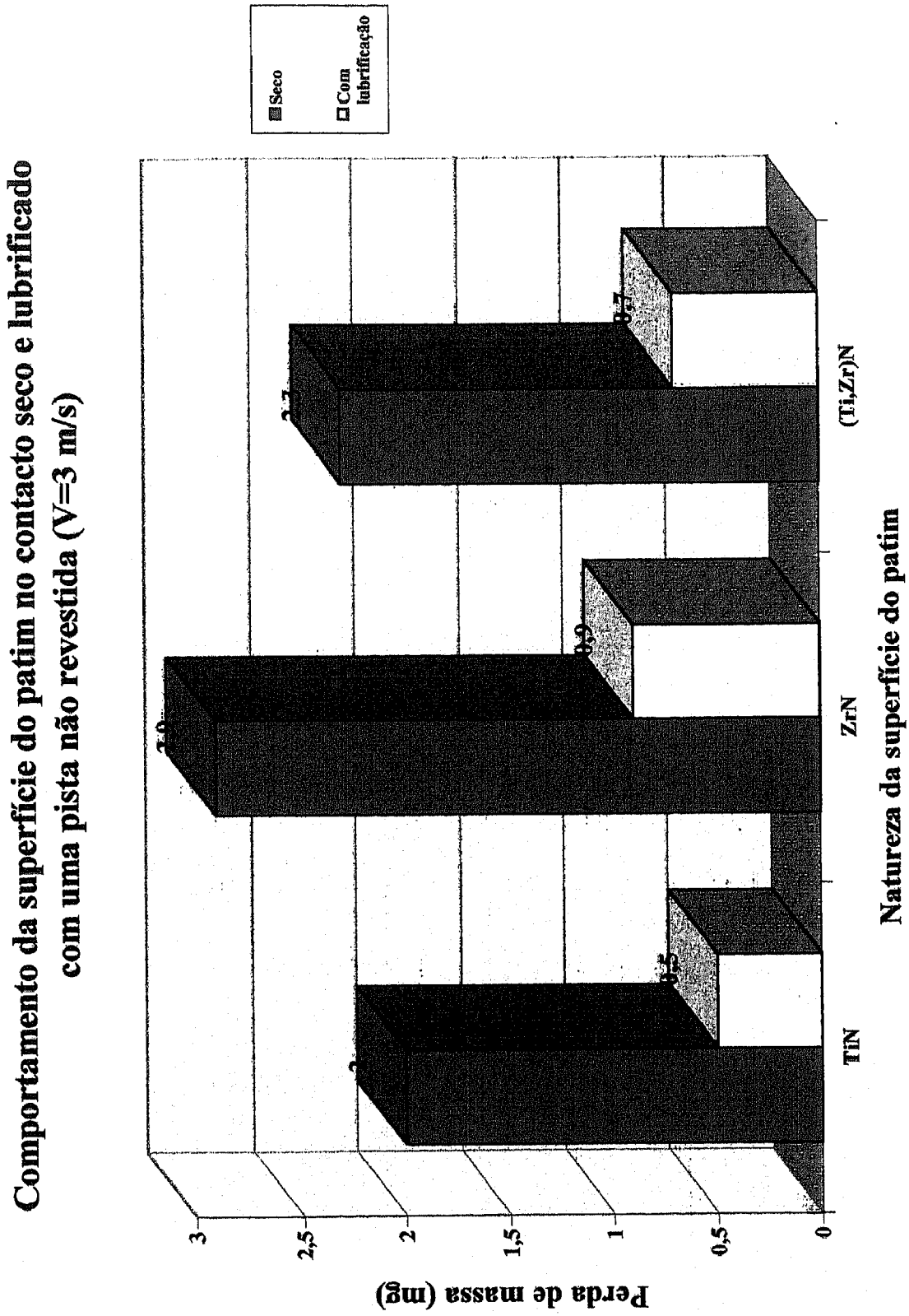


Figura 2.28 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista não revestida (V= 3m/s)

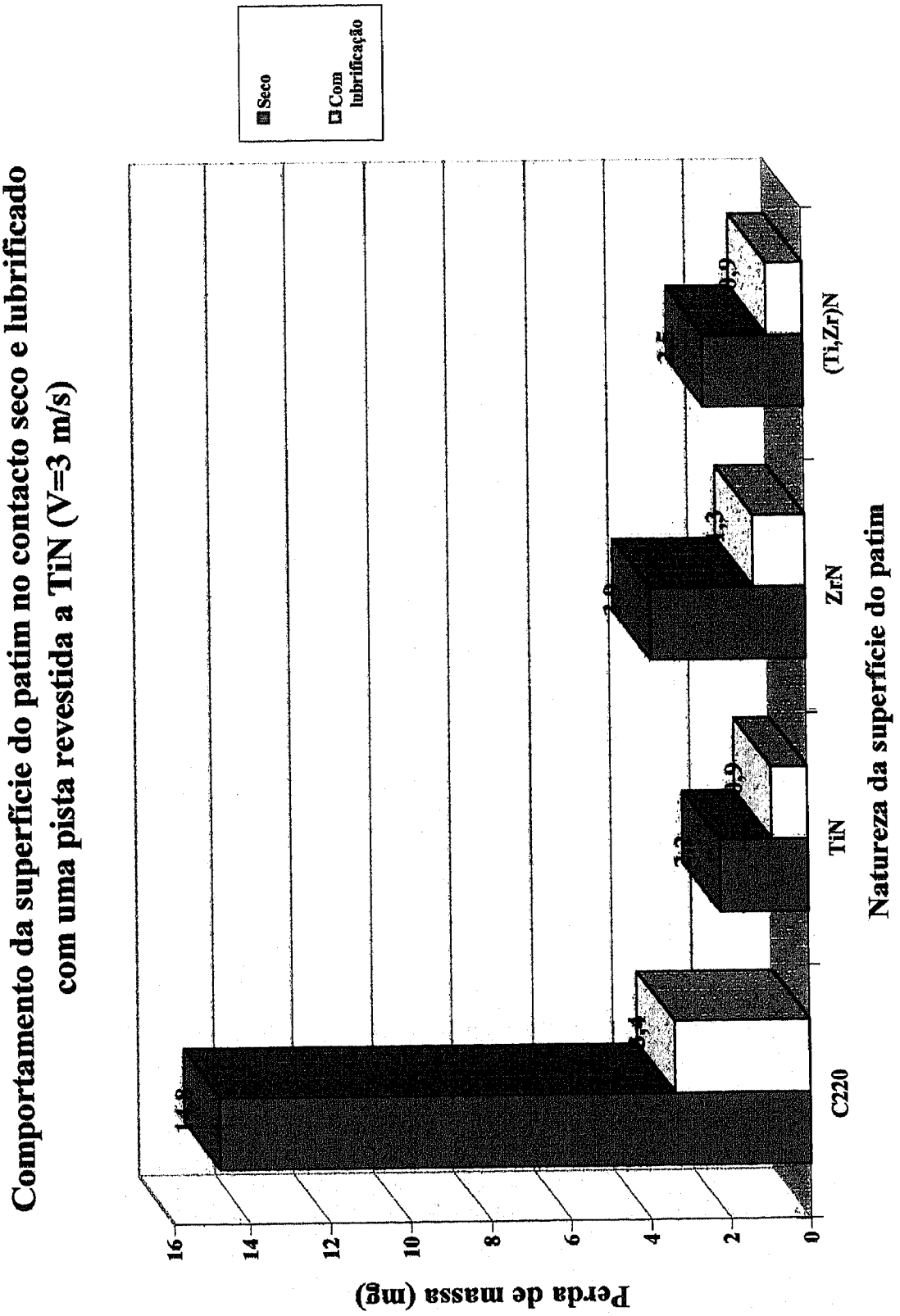


Figura 2.29 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista revestida a TiN (V= 3m/s)

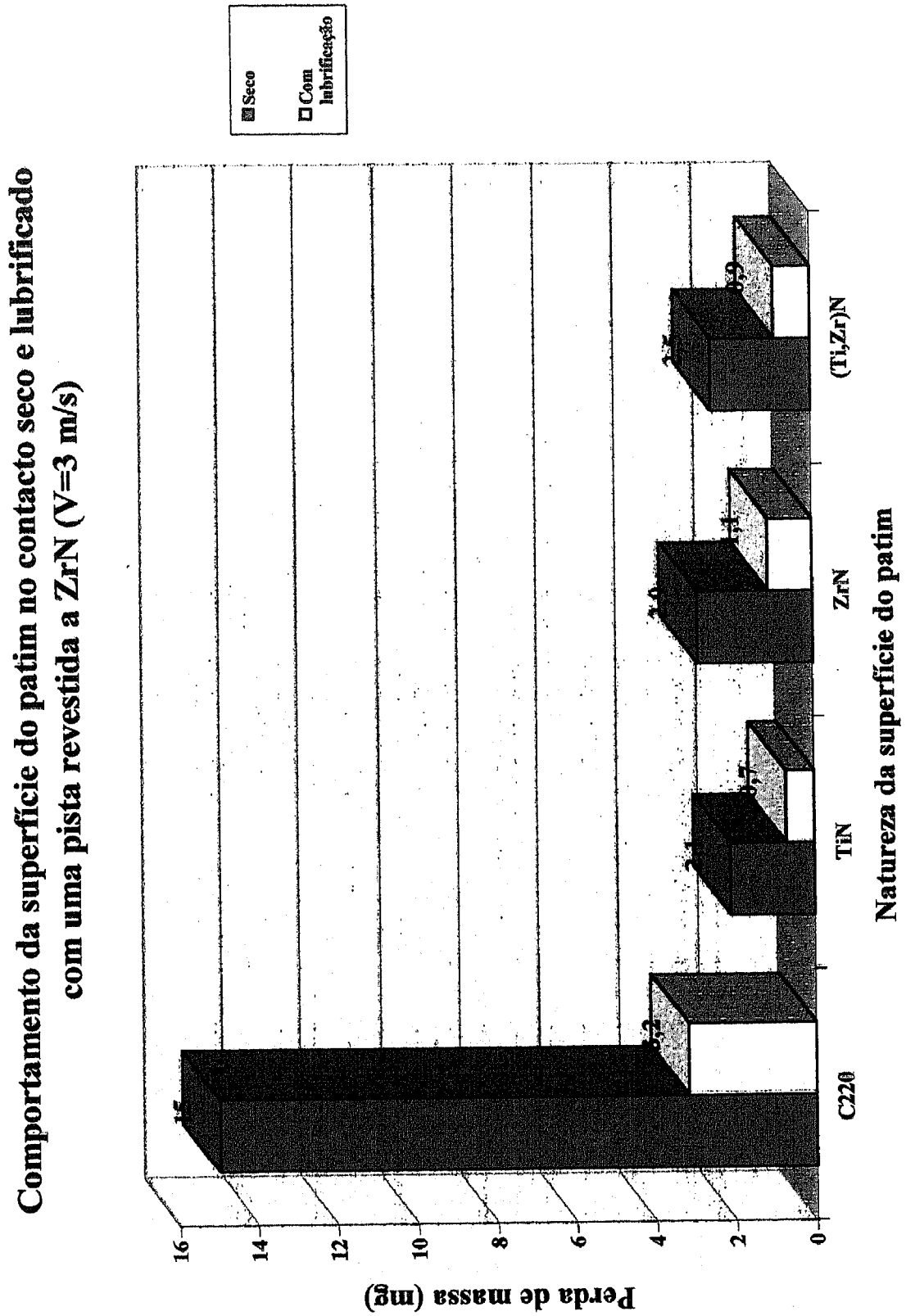


Figura 2.30 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista revestida a ZriN (V= 3m/s)

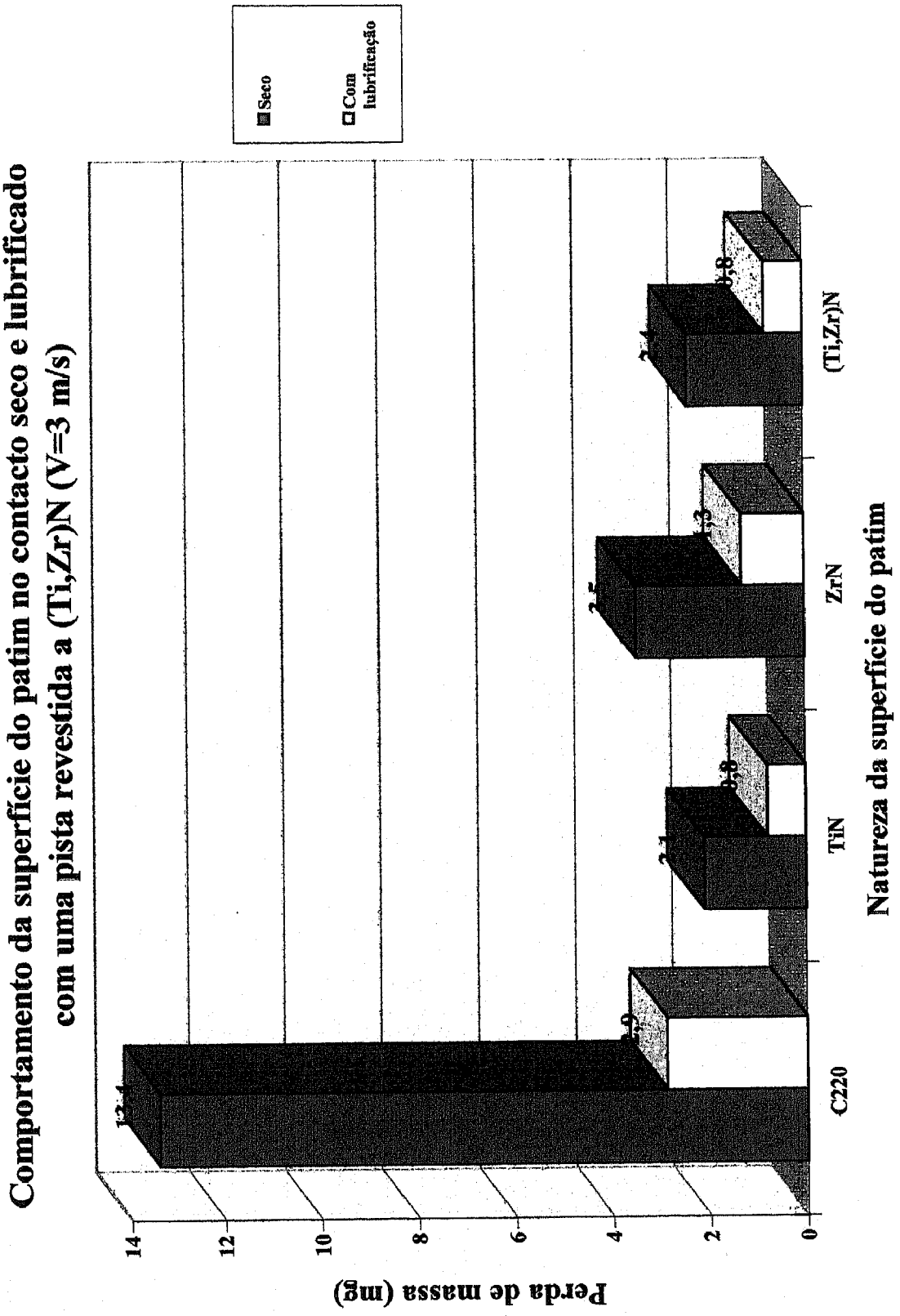


Figura 2.31 - Gráfico do comportamento da superfície do patim seco e lubrificado com uma pista revestida a (Ti, Zr)N (V= 3m/s)

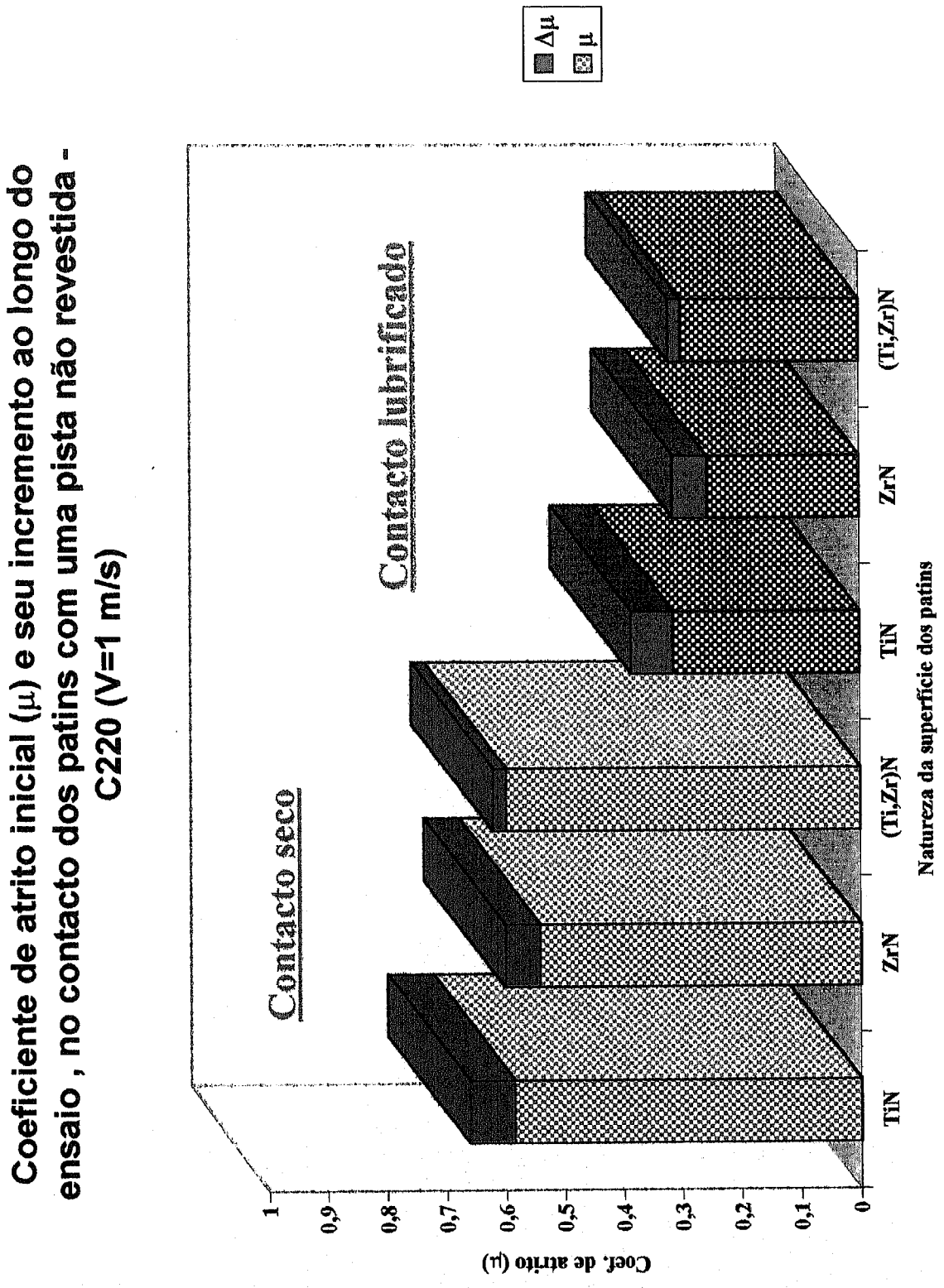


Figura 2.32 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista não revestida - C220 (V= 1m/s)

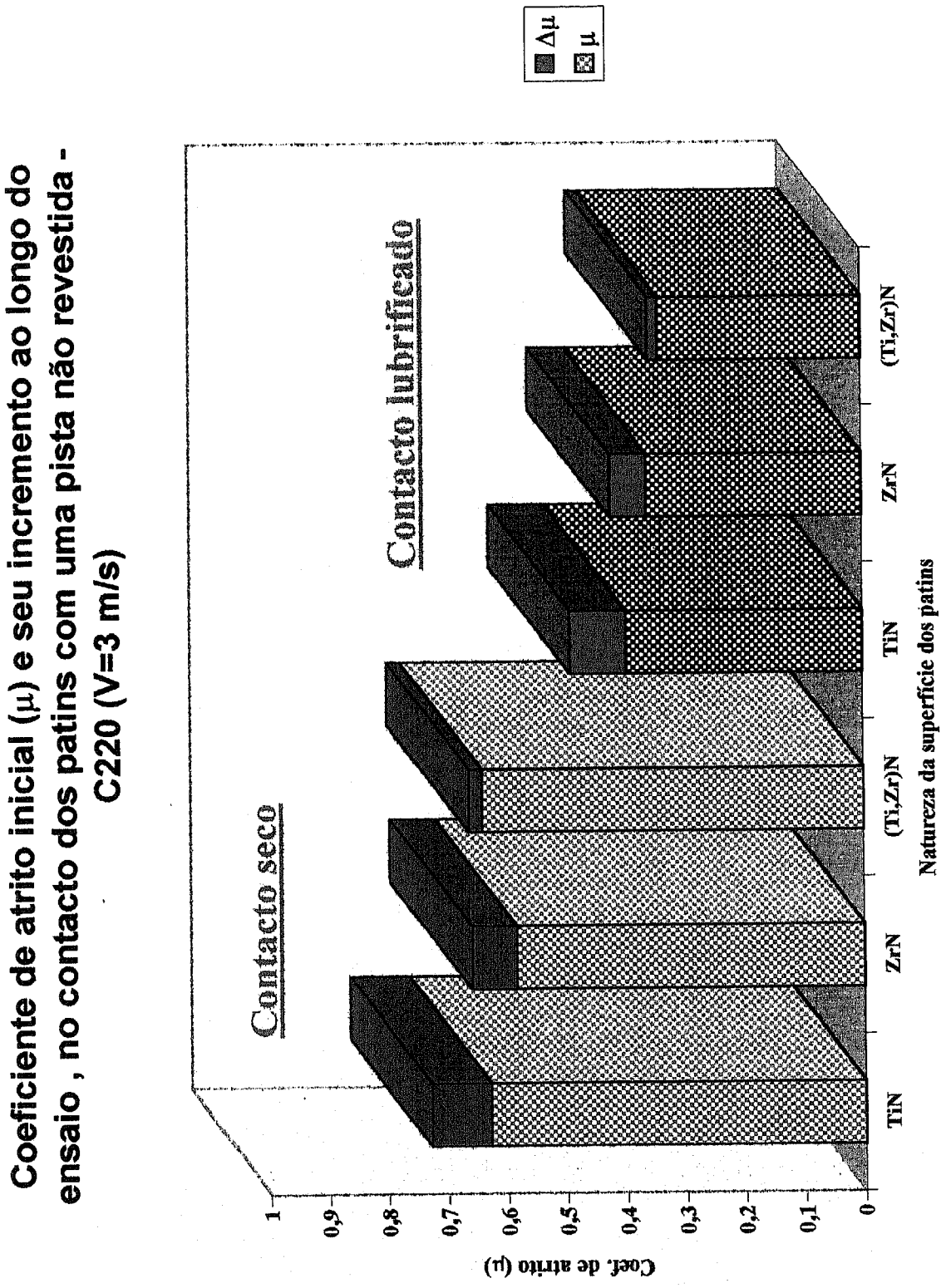


Figura 2.33 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista não revestida - C220 (V= 3m/s)

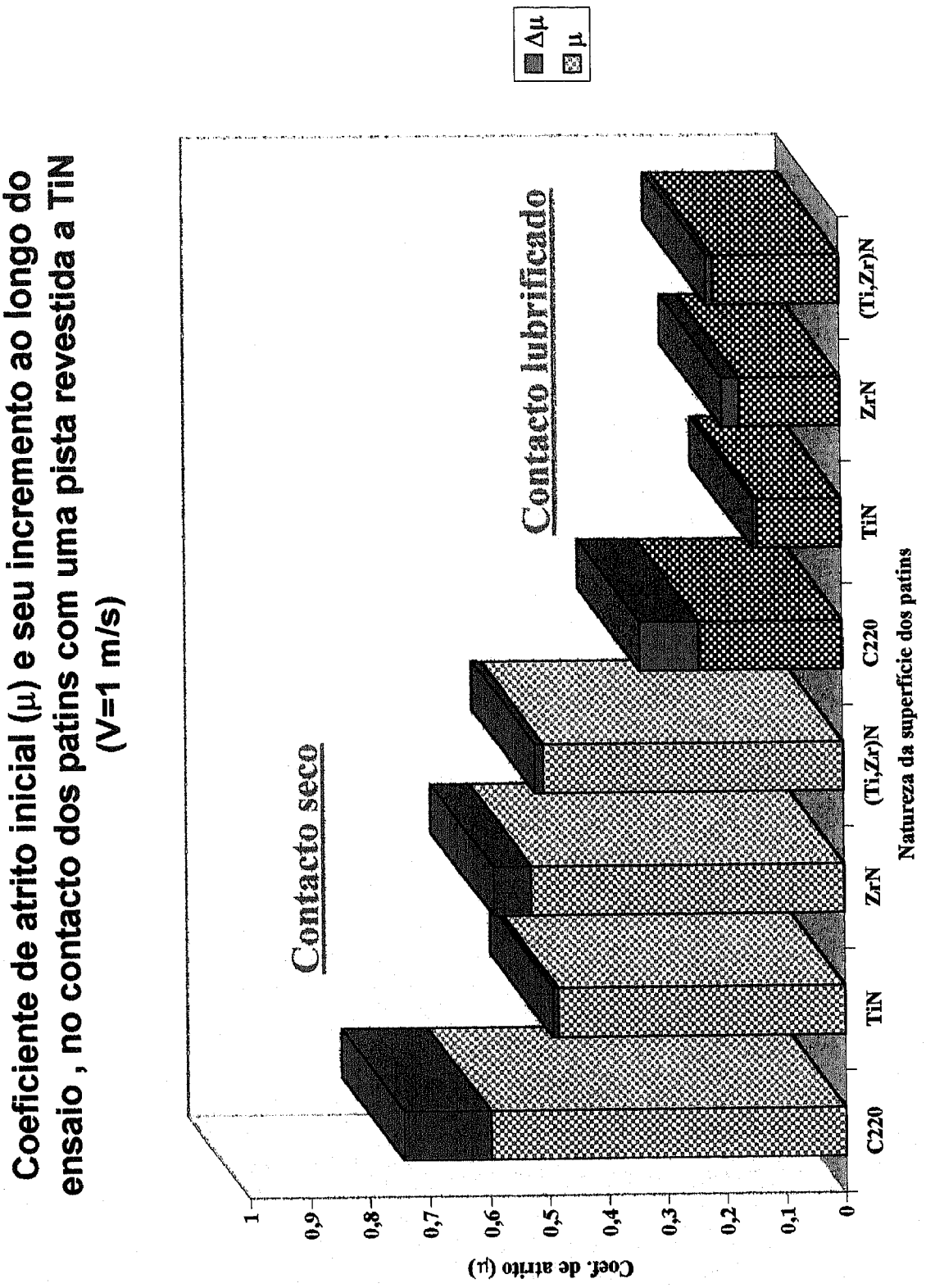


Figura 2.34 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a TiN (V= 1m/s)

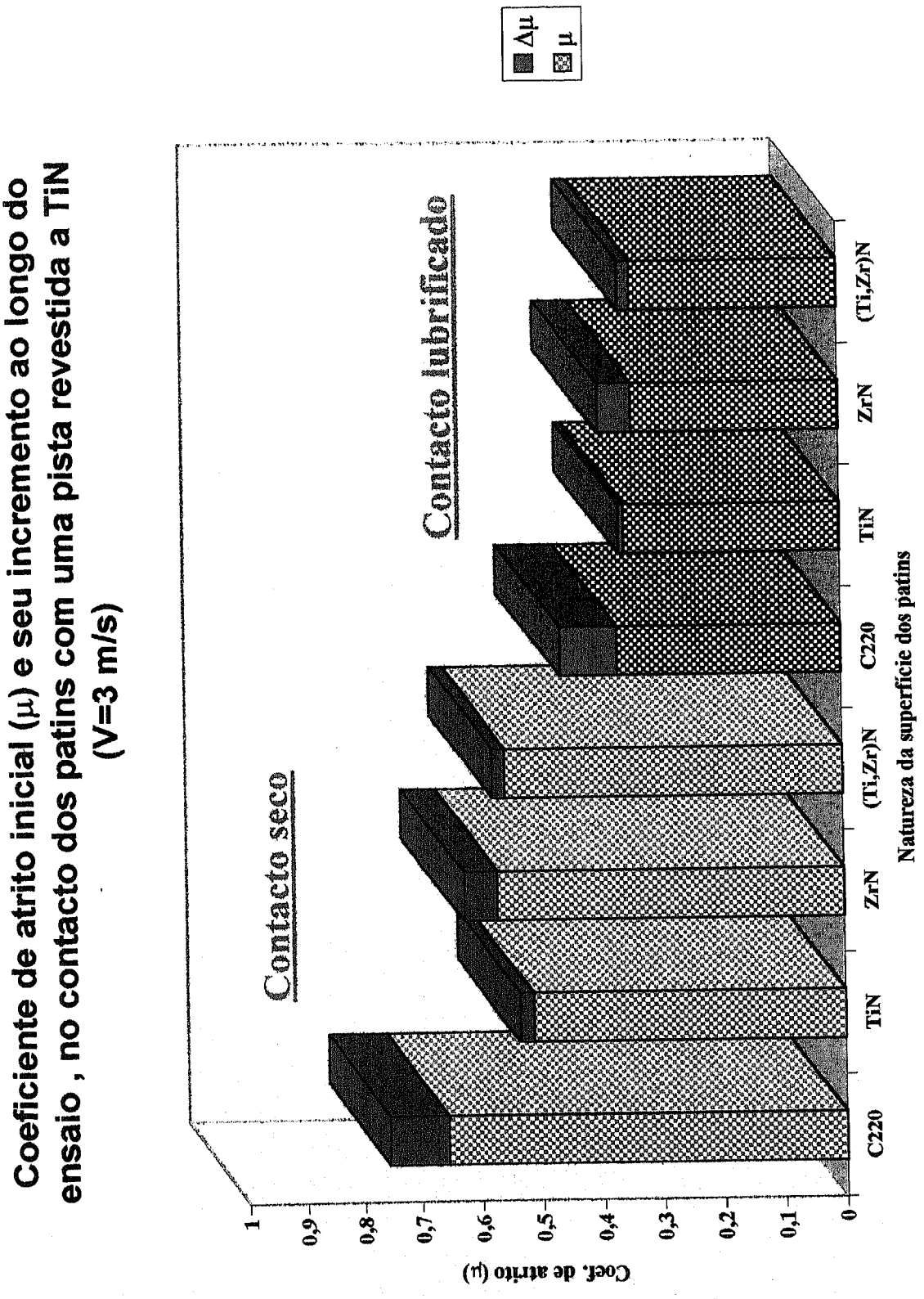


Figura 2.35 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a TiN (V= 3m/s)

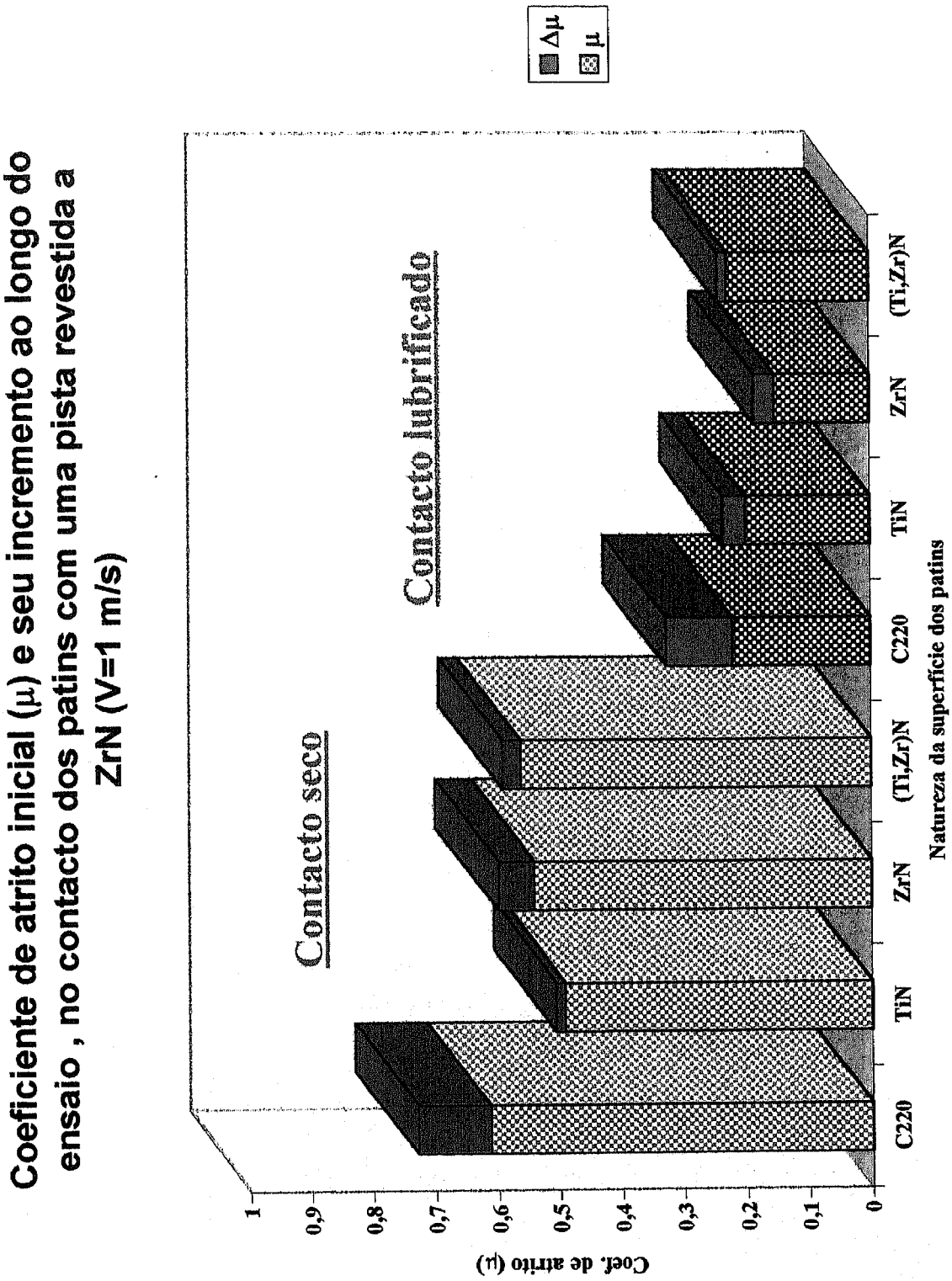


Figura 2.36 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a ZrN (V= 1m/s)

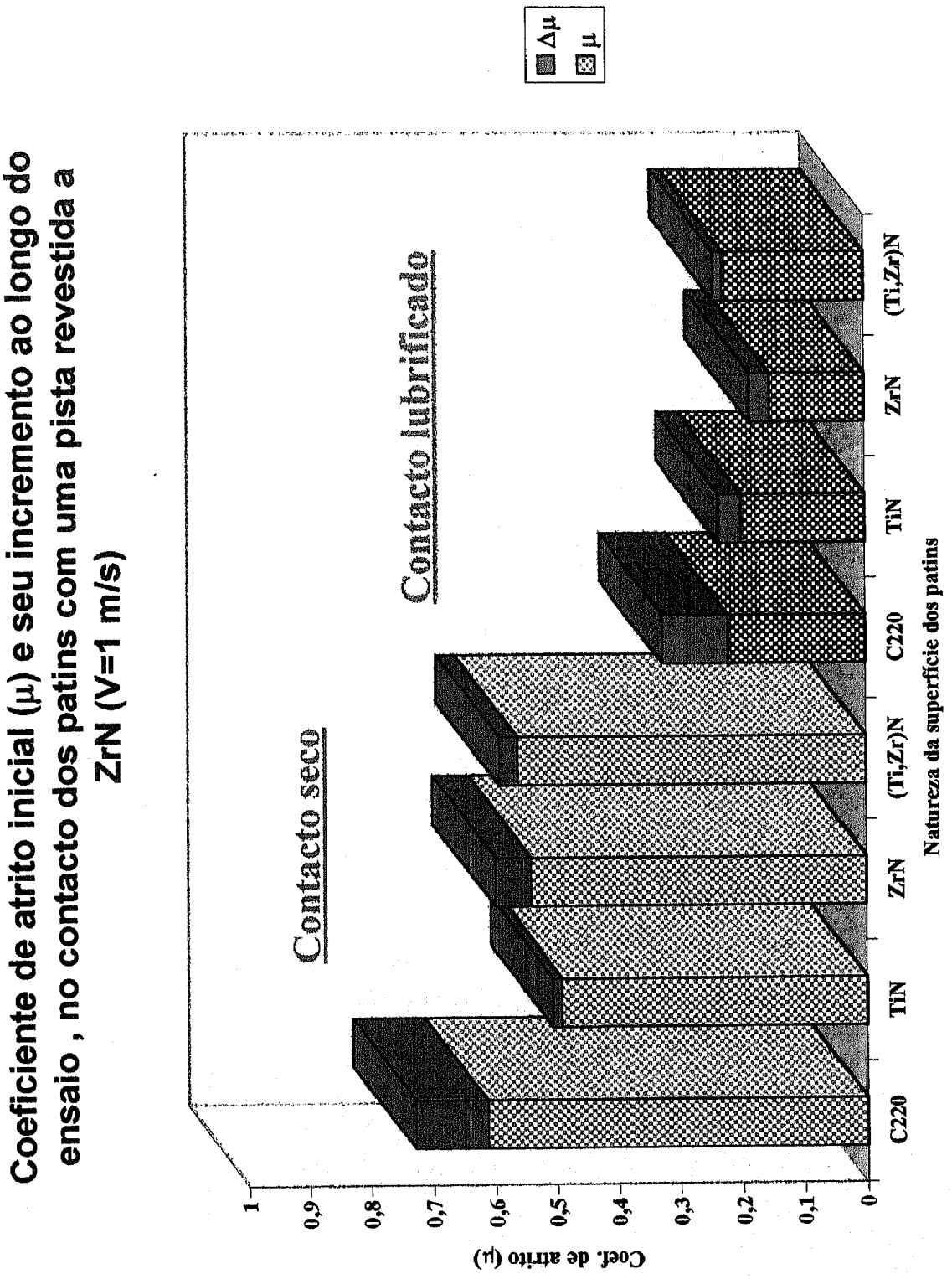


Figura 2.36 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a ZrN (V= 1m/s)

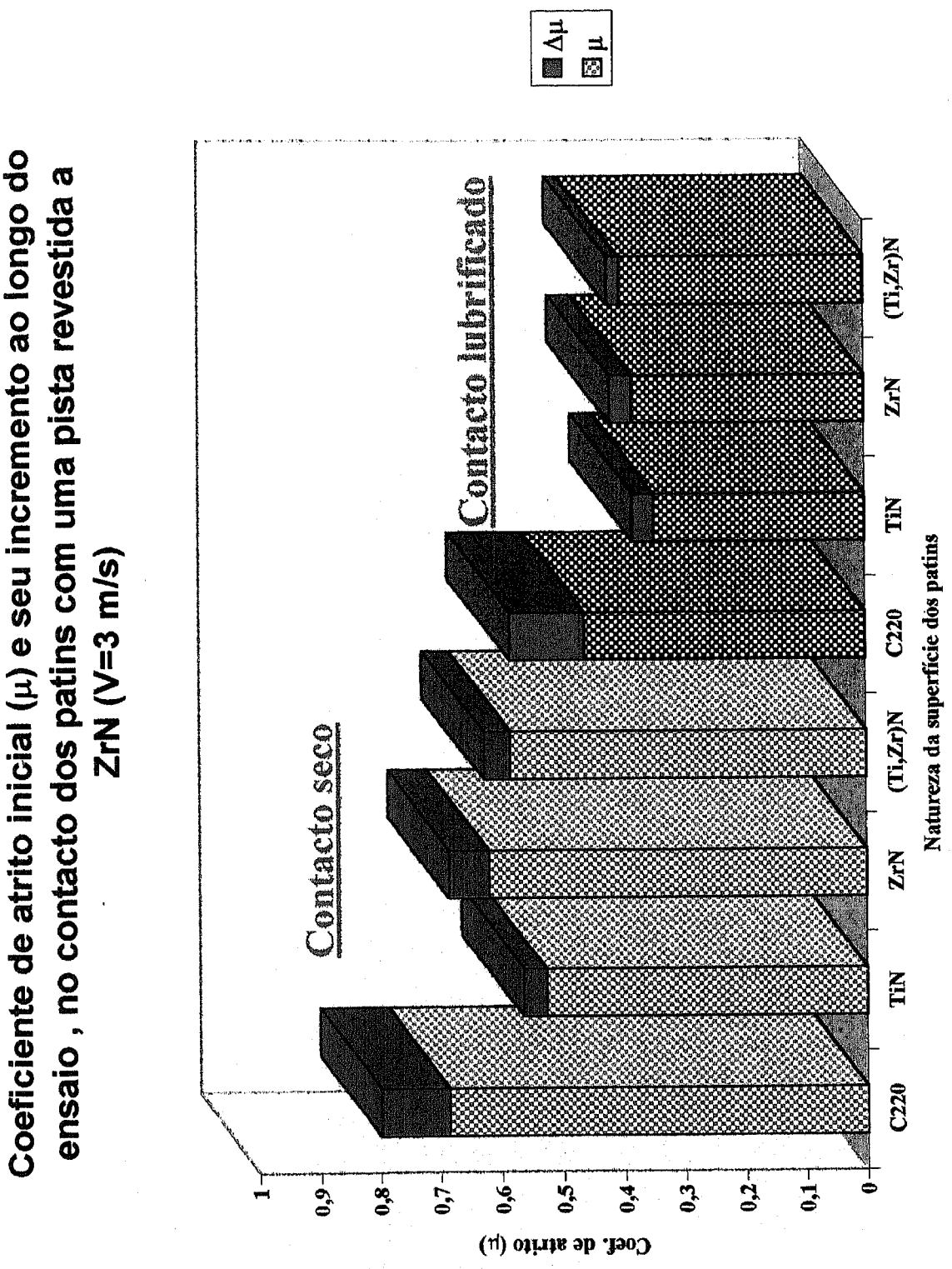


Figura 2.37 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a ZrN (V= 3m/s)

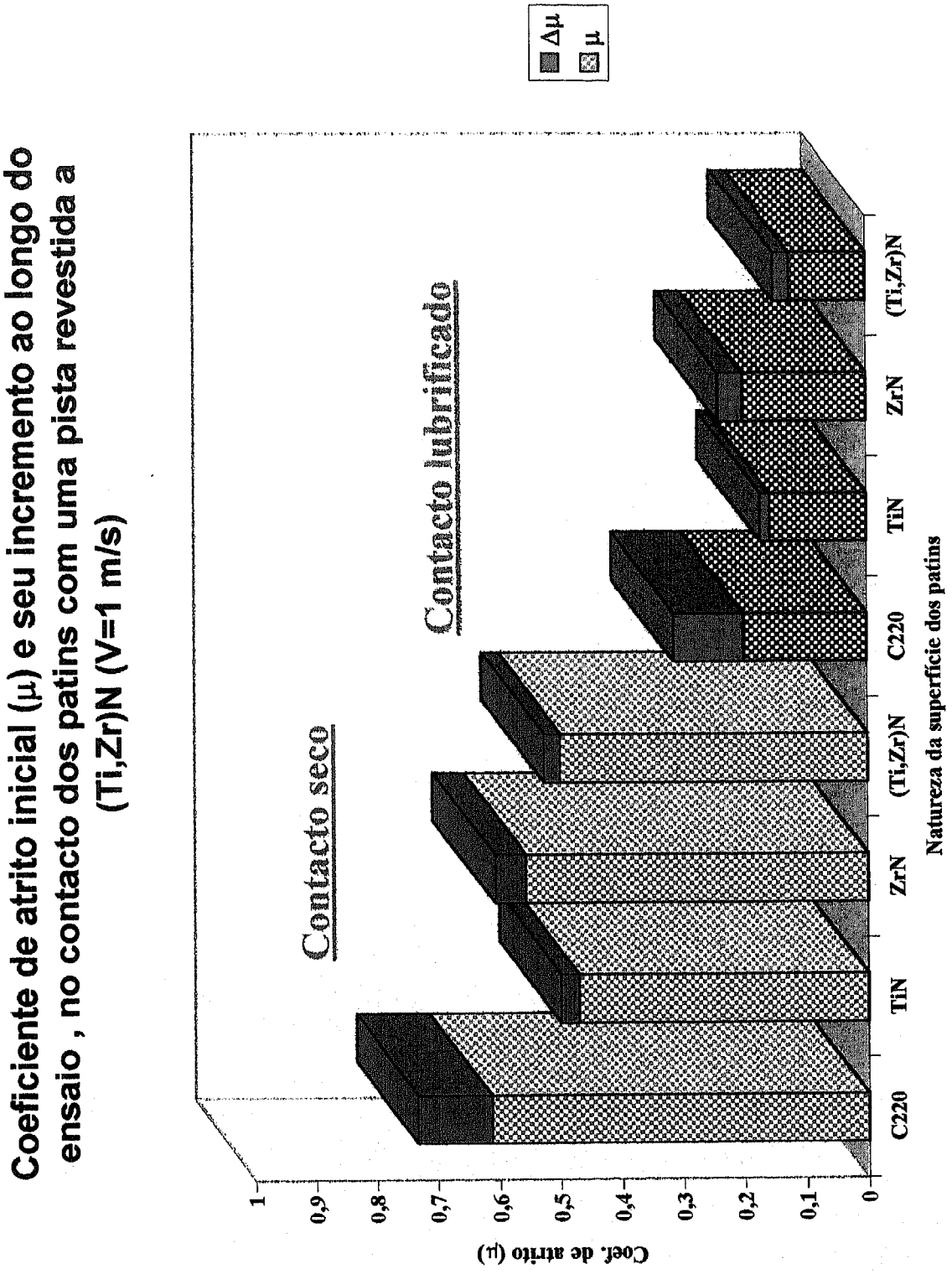


Figura 2.38 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a (Ti, Zr)N (V= 1m/s)

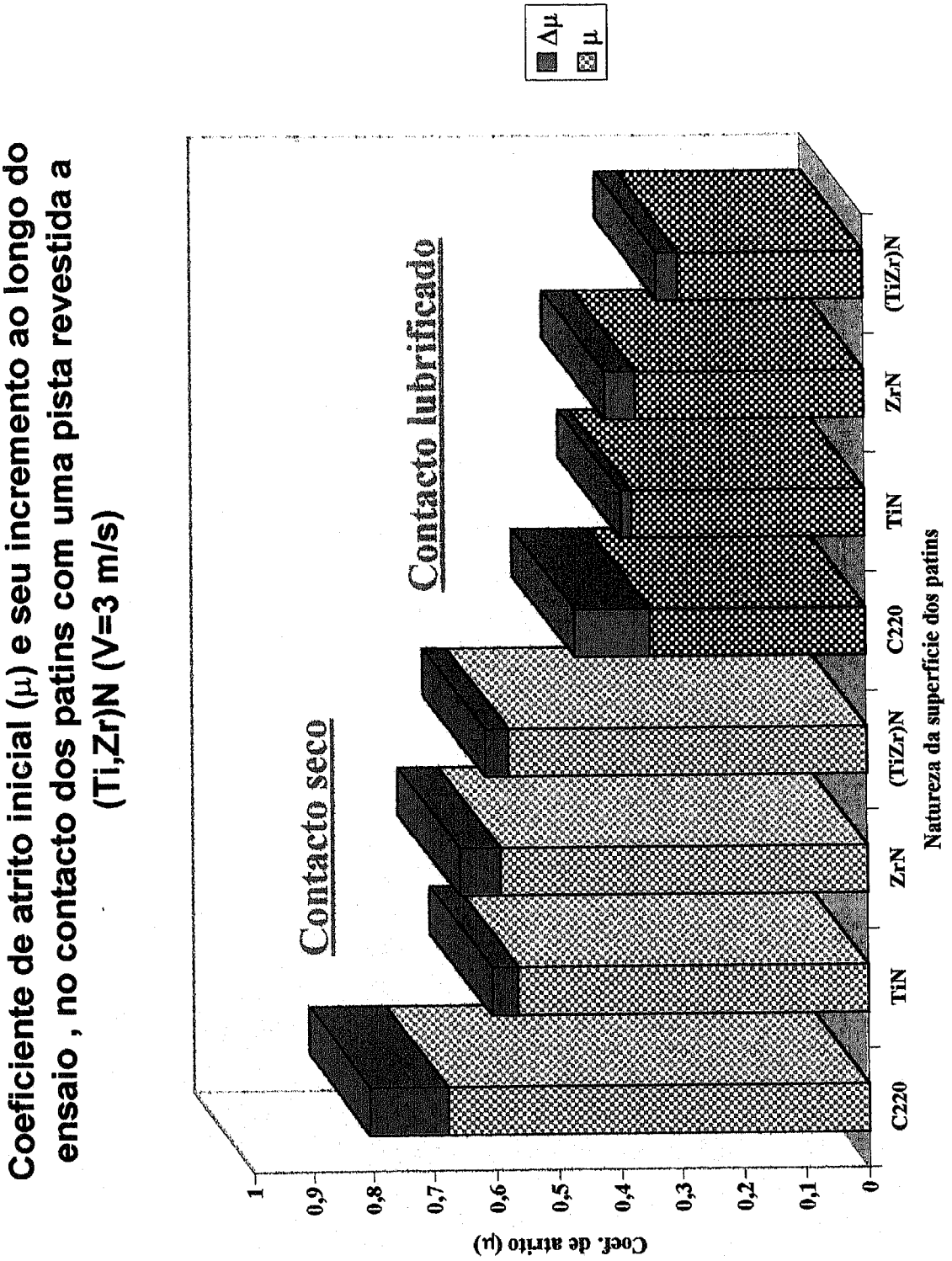


Figura 2.39 - Gráfico do coeficiente de atrito inicial (μ) e seu incremento ao longo do ensaio, no contacto dos patins com uma pista revestida a (Ti, Zr)N (V= 3m/s)

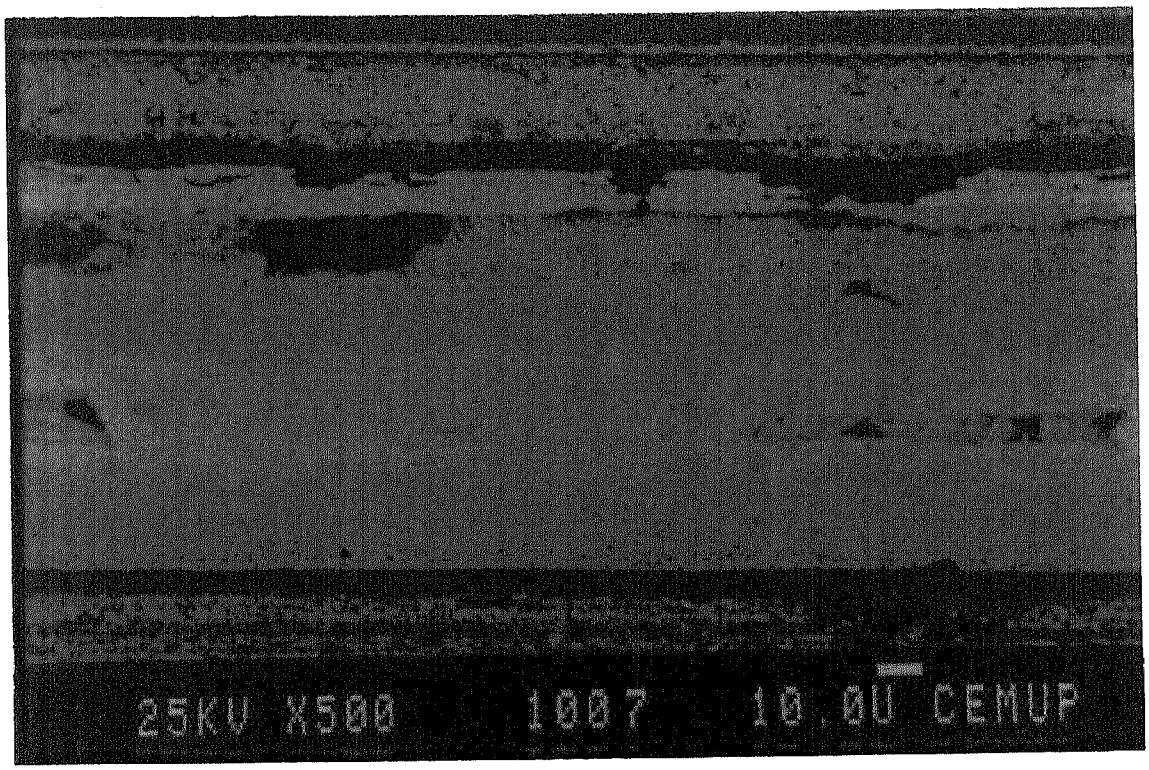


Figura 2.41 - Imagem da mesma zona da foto anterior, obtida com electrões rectro-difundidos, onde poderá ser observado o alojamento de óxidos

Na superfície da pista registou-se a formação de películas aderentes, constituídas por partículas de desgaste libertadas pelo patim não revestido, e por óxidos formados no contacto. Estas películas formam-se e libertam-se a um bom ritmo. A sua libertação vai contribuindo para o aumento da rugosidade das superfícies em contacto devido a fenómenos de abrasão, o que contribui para uma aumento quase constante do coeficiente de atrito. Nestes contactos, a primeira fase de desgaste, normalmente designada por rodagem, e a fase seguinte de formação da película estão quase sobrepostas, não sendo possível na maior parte dos casos estabelecer uma fronteira entre estas duas fases. Também não fica perfeitamente perceptível a fase de estabilização da força de atrito, registando-se apenas uma fase de crescimento mais moderado do coeficiente de atrito seguido, em alguns casos, por uma subida mais acentuada no fim do ensaio, quando se verifica libertação de partículas da superfície revestida.

O aspecto das películas formadas ao longo da superfície revestida das pista, no contacto com uma superfície não revestida, poderá ser observada nas figuras 2.42 e 2.43.

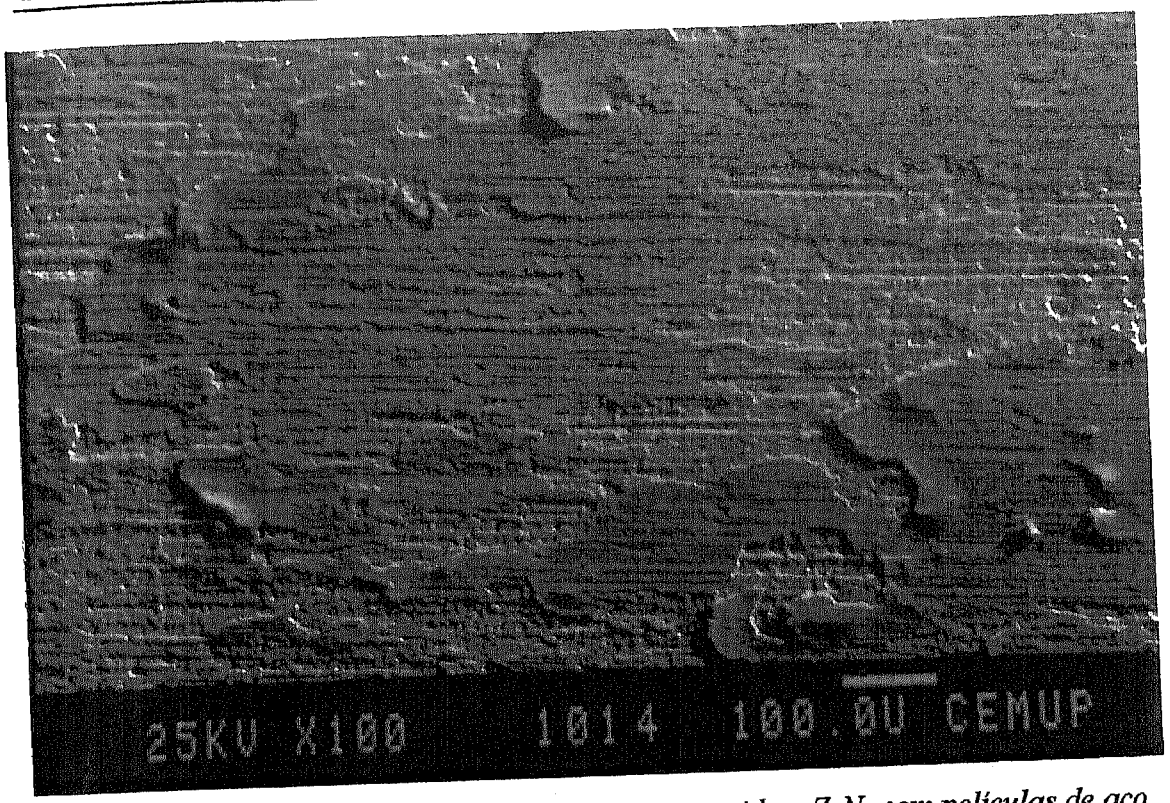


Figura 2.42 - Imagem da superfície de uma pista revestida a ZrN, com películas de aço formadas na sua superfície por transferência de material (V = 1 m/s)

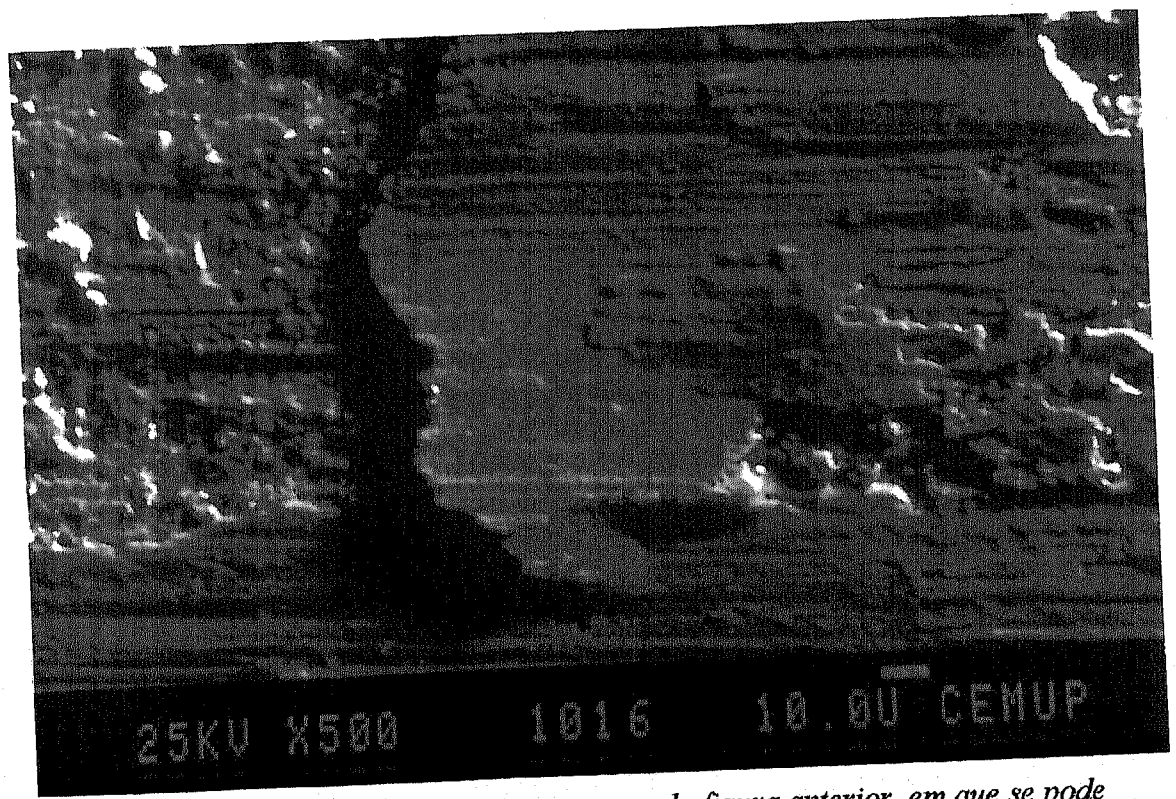


Figura 2.43 - Imagem em pormenor de uma zona da figura anterior, em que se pode observar o mecanismo de libertação de uma película de óxido da superfície de uma pista revestida a ZrN

As pistas revestidas a ZrN mostraram maior apetência para criação e ancoragem das películas de óxidos. Comparando a imagem anterior com as imagens seguintes, poderá verificar-se que as pistas revestidas a TiN apresentam uma maior área de revestimento não coberto por películas de óxidos. Isso está patente nas figuras 2.44 e 2.45, onde poderá também ser observado o mecanismo de libertação das películas de óxido.

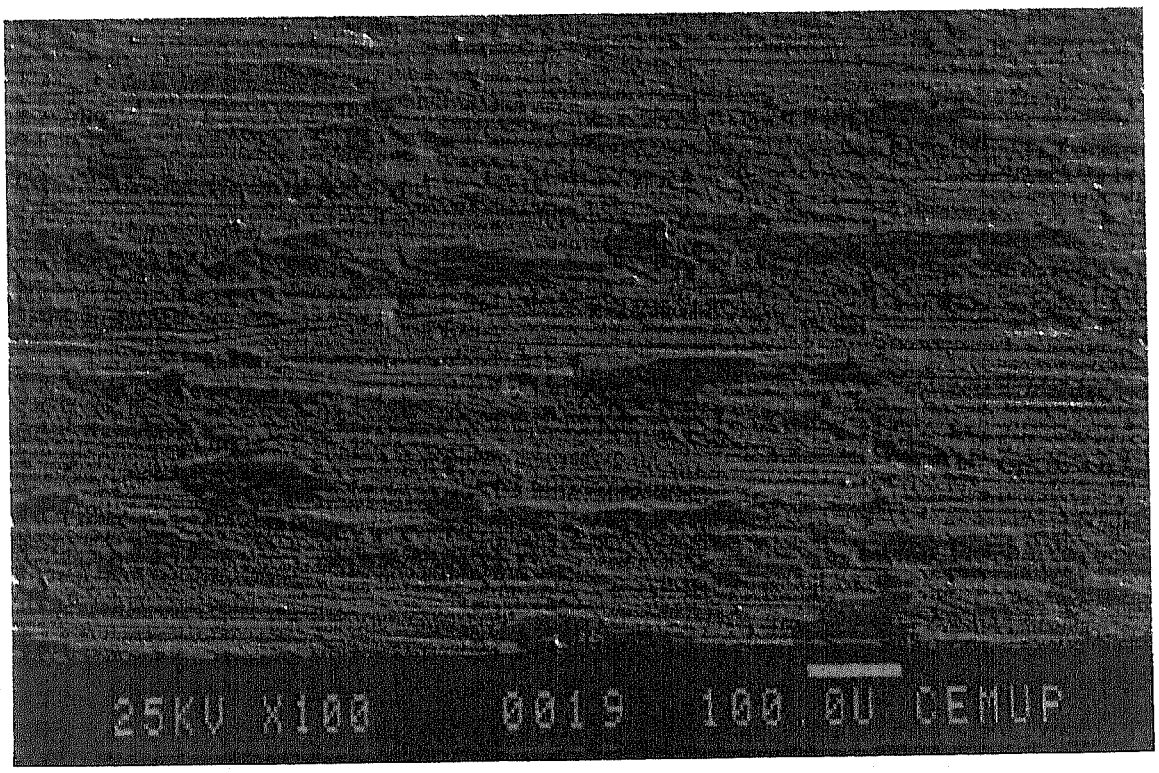


Figura 2.44 - Imagem que ilustra o aspecto geral da formação de películas de óxidos na superfície de uma pista revestida a TiN, que esteve em contacto com um patim não revestido, com uma velocidade de deslizamento de 3 m/s.

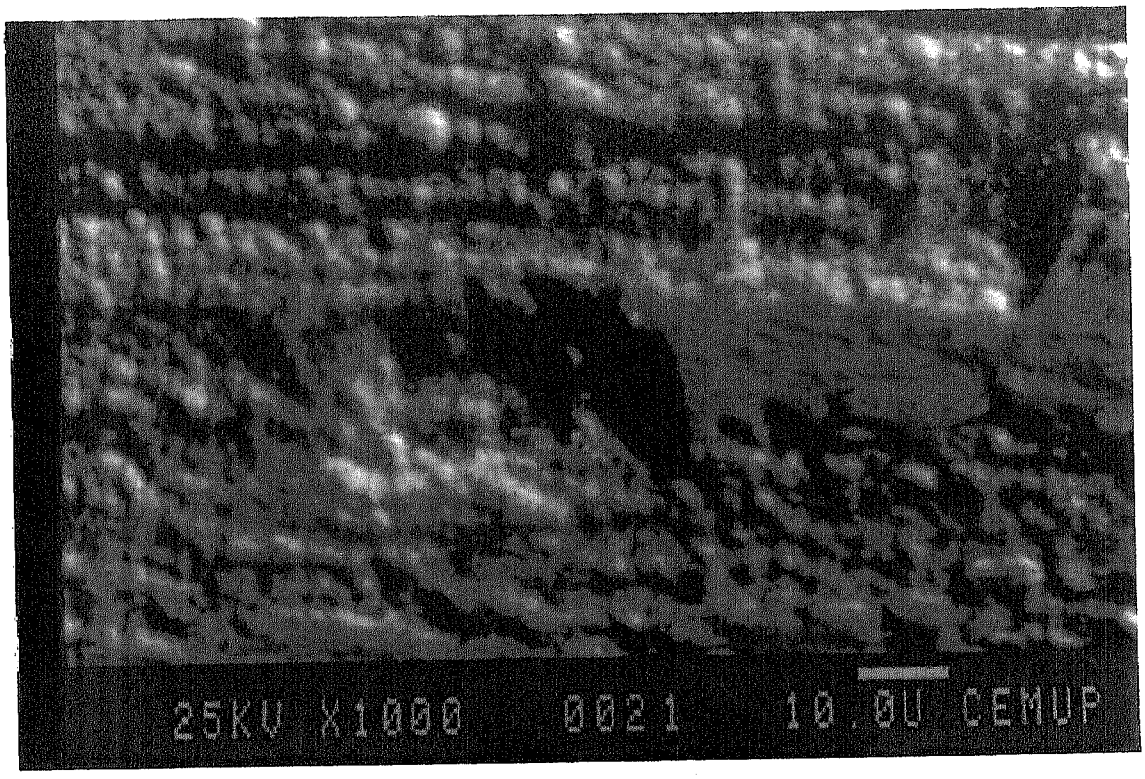


Figura 2.45 - Imagem de uma zona particular da foto anterior

Foram efectuadas duas análises à película de óxido da figura anterior, uma a maior potencial para analisar a película em profundidade (película de óxido e revestimento) e outra a menor potencial, para analisar apenas a película, sem atingir o revestimento. Os espectros obtidos por EDS a 15KV e 25KV são apresentados nas figuras 2.46 e 2.47, podendo ser observado o teor de titânio na análise a maior profundidade, correspondente ao revestimento, e o alto teor de óxido de ferro patente no espectro de mais baixo potencial, provando a clara transferência de material que se verificou do patim não revestido para a pista.

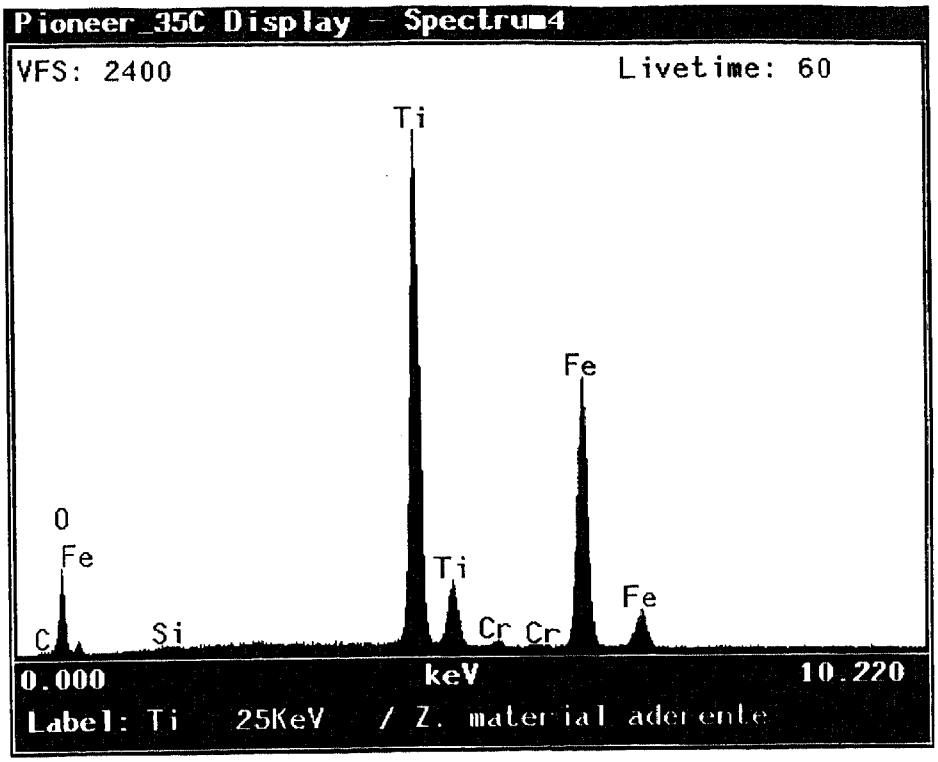


Figura 2.46 - Espectro efectuado por EDS a 25KV, analisando a película em profundidade, e revelando a existência de revestimento por baixo da película de óxido

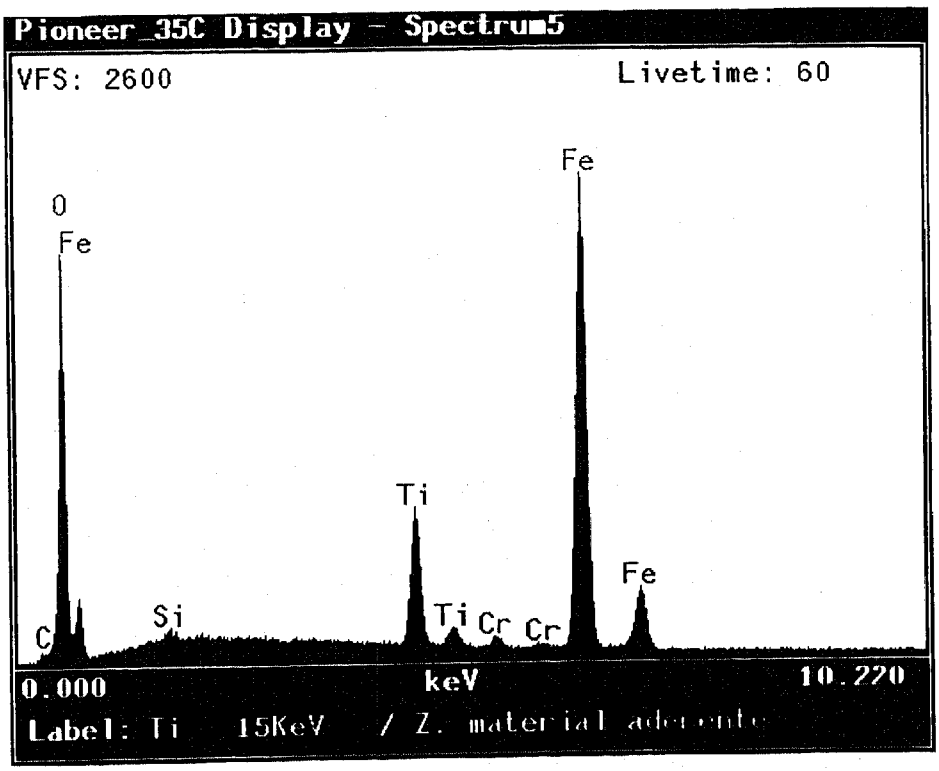


Figura 2.47 - Espectro efectuado por EDS a 15KV, revelando a forte presença de óxidos de ferro provenientes da libertação de partículas de desgaste do não revestido

Quando no patim é utilizada uma superfície revestida e para a pista é utilizada uma superfície não revestida, o patim liberta algumas pequenas partículas de desgaste na fase inicial do contacto, começando seguidamente a criar sulcos na superfície oposta, correspondentes aos seus picos de rugosidade. A transferência de material do patim revestido para a pista é muito diminuta, verificando-se essencialmente a formação de óxidos. As figuras 2.48 e 2.49 ilustram uma superfície não revestida, com uma zona onde se pode observar a superfície rectificada, e outra zona marcada por sulcos devidos ao contacto desta superfície com um patim revestido a (Ti,Zr)N. Na segunda imagem, realizada na mesma zona que a primeira, mas com recurso a electrões secundário rectro-difundidos , poderá observar-se a formação de óxidos ao longo dos sulcos.

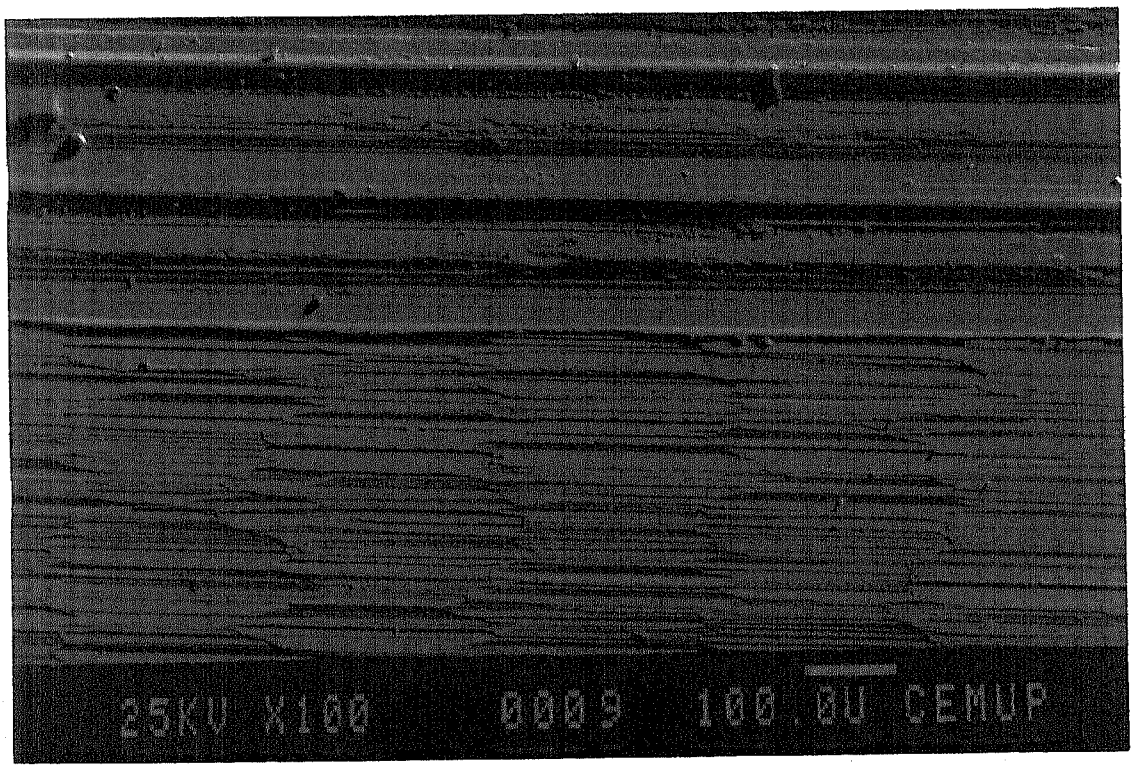


Figura 2.48 - Imagem da superfície de uma pista não revestida, com uma zona rectificada que não esteve em contacto, e uma zona de sulcos, correspondentes ao contacto com um patim revestido a (Ti,Zr)N

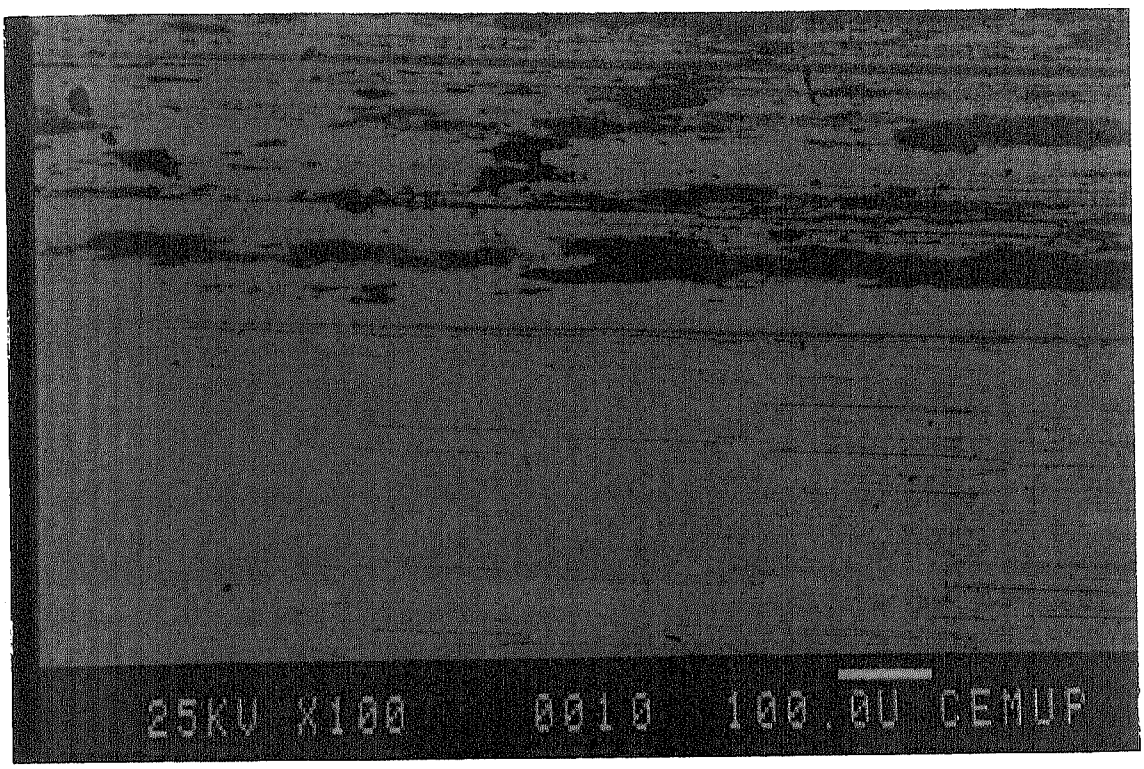


Figura 2.49 - Imagem idêntica à anterior, obtida com electrões secundários rectro-difundidos,

onde pode ser observada a camada de óxidos formada nos sulcos formados pelo contacto com o patim

Uma análise mais pormenorizada dessas camadas de óxido formadas na superfície não revestida deram origem às imagens das figuras 2.50 e 2.51. Foi efectuada uma análise por EDS a uma zona limpa e a outra oxidada, por forma a verificarmos se existia vestígios abundantes de material do patim na camada de óxido formada. A análise EDS, apresentada nas figuras 2.52 e 2.53, efectuada a baixo potencial para que a análise revelasse apenas a composição da película, veio confirmar que existe um ligeiro acréscimo de titânio na zona oxidada, mas é muito diminuto.

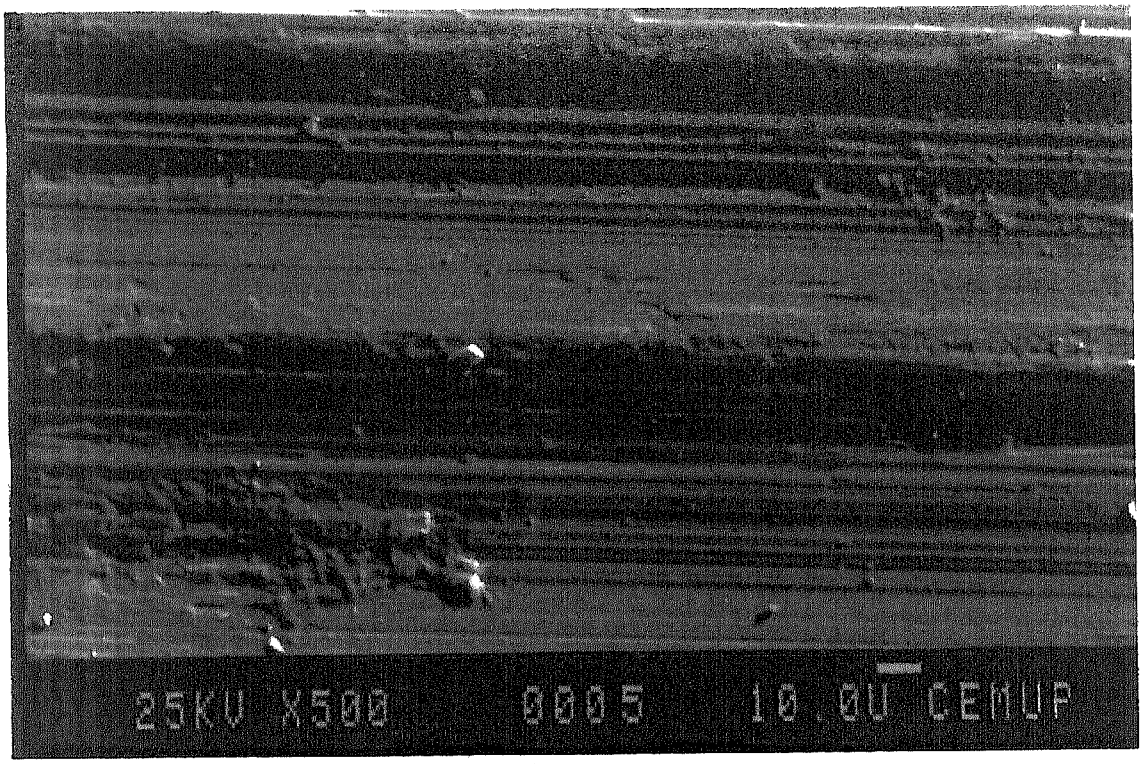


Figura 2.50 - Imagem da superfície de uma pista não revestida, em que são visíveis os sulcos provocados pelo contacto com o patim de (Ti,Zr)N e as películas de óxido formadas à superfície

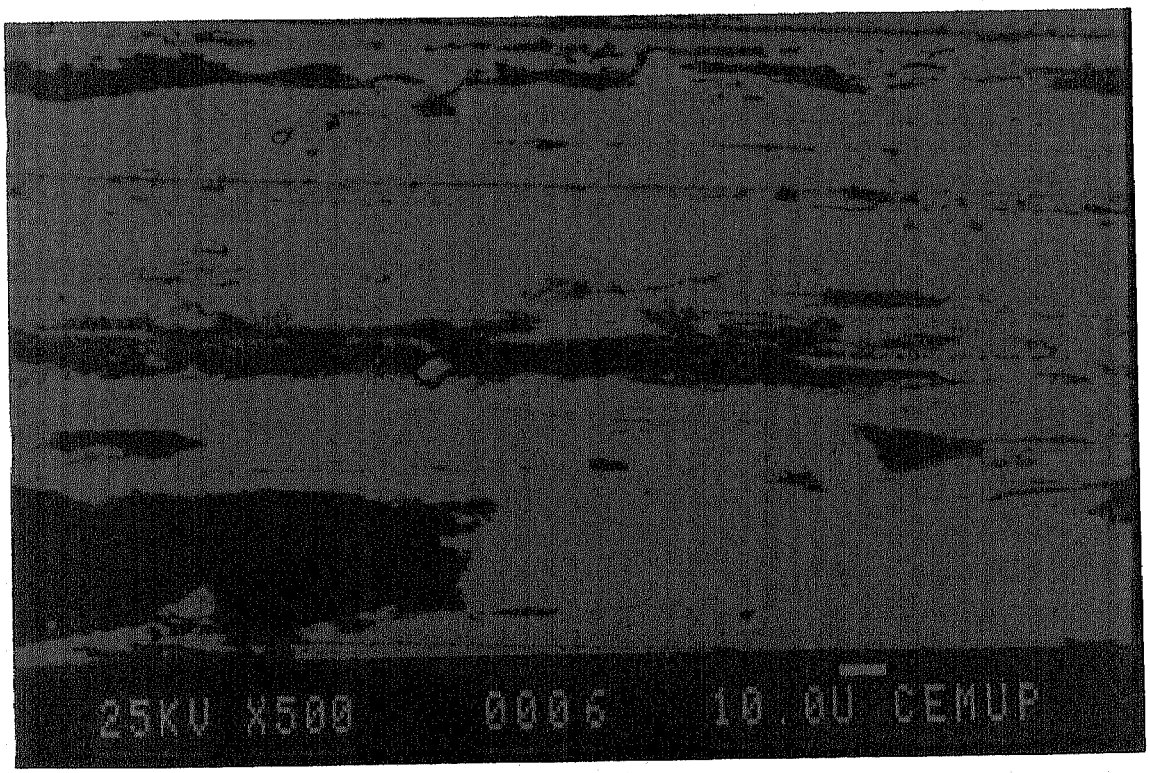


Figura 2.51 - Imagem idêntica à anterior, efectuada com electrões rectro-difundidos, para confirmação da presença de óxidos

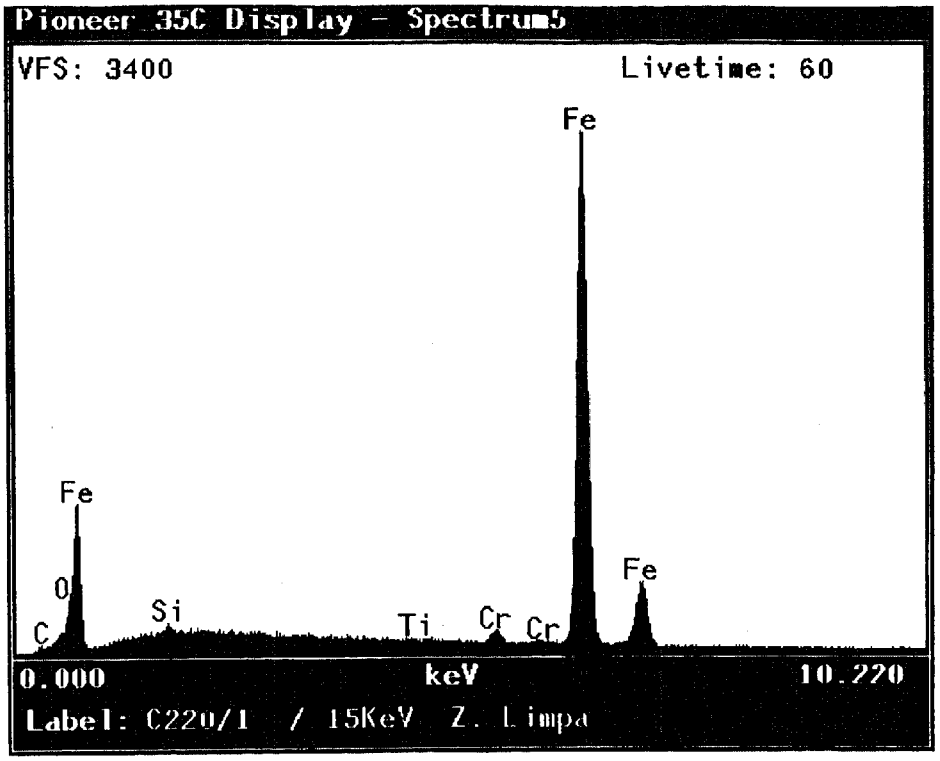


Figura 2.52 - Espectro da composição de uma zona limpa correspondente às fotos anteriores

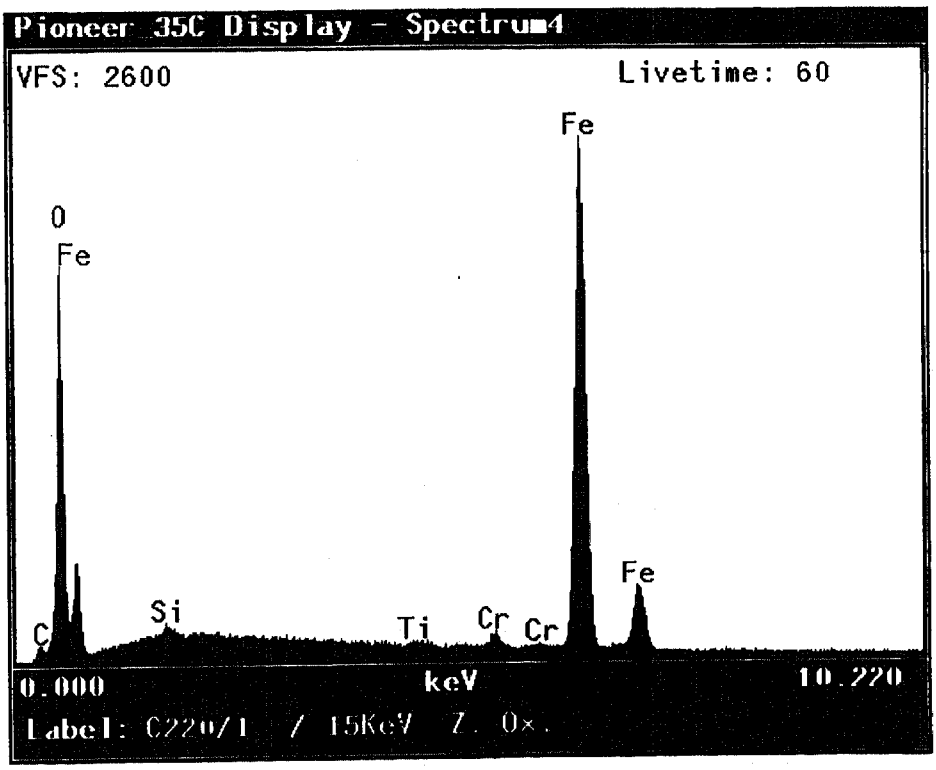


Figura 2.53 - Espectro da composição de uma zona oxidada da mesma superfície não revestida

Os comentários efectuados até ao momento referem-se exclusivamente a contactos efectuados a seco. A introdução de lubrificação no contacto deu origem a uma evolução bastante favorável do coeficiente de atrito nos contactos em que uma das superfícies não se encontrasse revestida. A maior adsorção do lubrificante pela superfície não revestida conduziu a uma melhoria mais significativa do coeficiente de atrito.

O contacto entre superfícies revestidas mostrou um comportamento mais regular no que respeita ao coeficiente de atrito. Neste tipo de contactos tornou-se mais perceptível uma fronteira entre as diversas fases de desgaste ao longo do ensaio. O coeficiente de atrito inicialmente registado foi normalmente inferior aos dos contactos entre superfícies revestidas e não revestidas, sendo também ligeiramente inferior o incremento do seu valor verificado ao longo do ensaio.

Neste tipo de contactos, e de uma forma geral, verificou-se a existência de uma fase de rodagem e de formação de óxidos que está normalmente traduzida numa subida inicial do coeficiente de atrito, seguida de uma estabilização mais ou menos prolongada, conforme o tipo de superfícies em contacto. Nas situações de contacto em que se verificou início ou mesmo propagação da rotura do revestimento, o coeficiente de atrito registou subidas súbitas, nos momentos finais do ensaio.

O contacto entre TiN-TiN a seco, a uma velocidade de 1 m/s, verificou um comportamento bastante linear do coeficiente de atrito, registando também valores de perda de massa bastante baixos por parte do patim. O aspecto da superfície do patim após ensaio poderá ser observada na figura 2.54. Nessa figura poderá constatar-se que não é visível a formação de qualquer película de óxido na sua superfície.

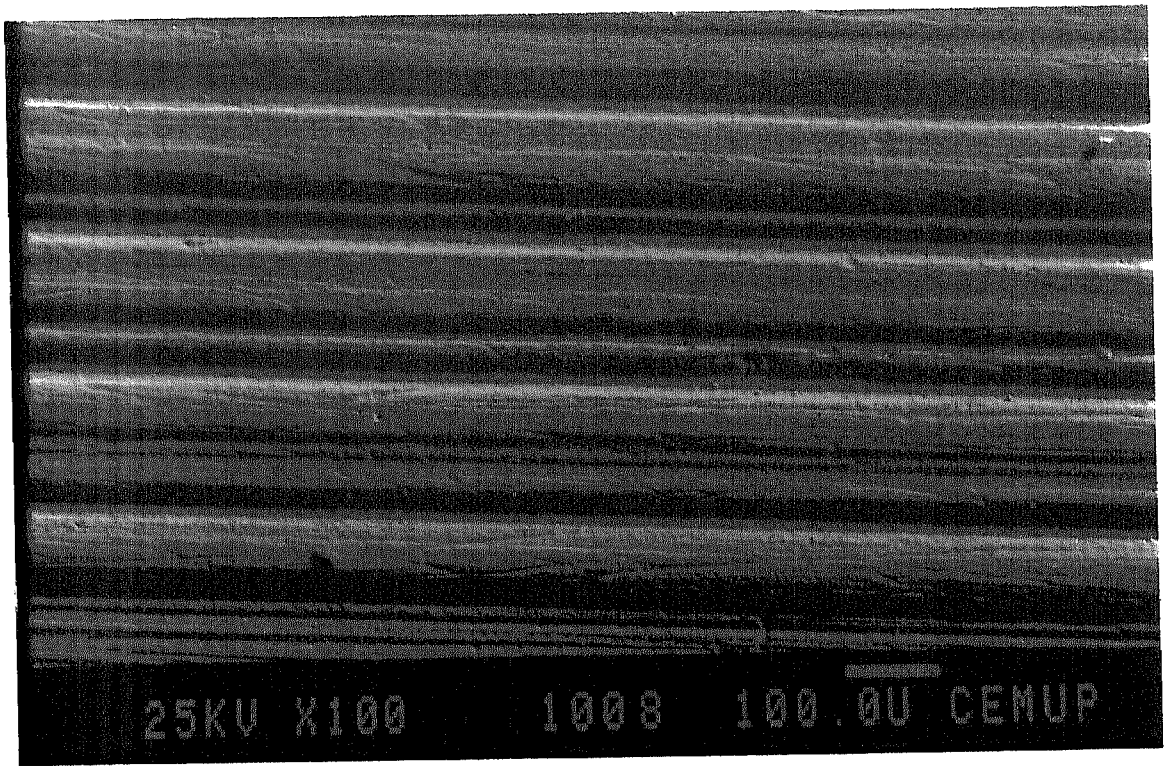


Figura 2.54 - Imagem que ilustra o aspecto da superfície de uma patim revestido a TiN, que esteve em contacto seco com uma pista provida do mesmo revestimento, a uma velocidade de 1 m/s

No entanto, não se verificou uniformidade nos fenómenos de desgaste registados na globalidade dos contactos entre superfícies revestidas. De facto, o patim revestido a (Ti,Zr)N que deslizou a 3 m/s sobre uma pista revestida a TiN sem lubrificação apresentou desgaste por adesão. Apesar da sua superfície apresentar um aspecto geral bastante bom, foram localizadas algumas pequenas roturas do revestimento que, embora em número muito reduzido, teriam certamente tendência a alastrar, e a criar possivelmente desgaste por abrasão. A figura 2.55 ilustra este facto, podendo ainda ser apreciado o facto de se ter verificado alguma falta de adesão entre a película superior e inferior do revestimento. Uma segunda imagem da mesma zona da superfície, obtida com electrões secundários rectro-difundidos permite verificar que existem zonas onde todo o revestimento se libertou, e outras zonas onde apenas se verifica a ausência da película superior.

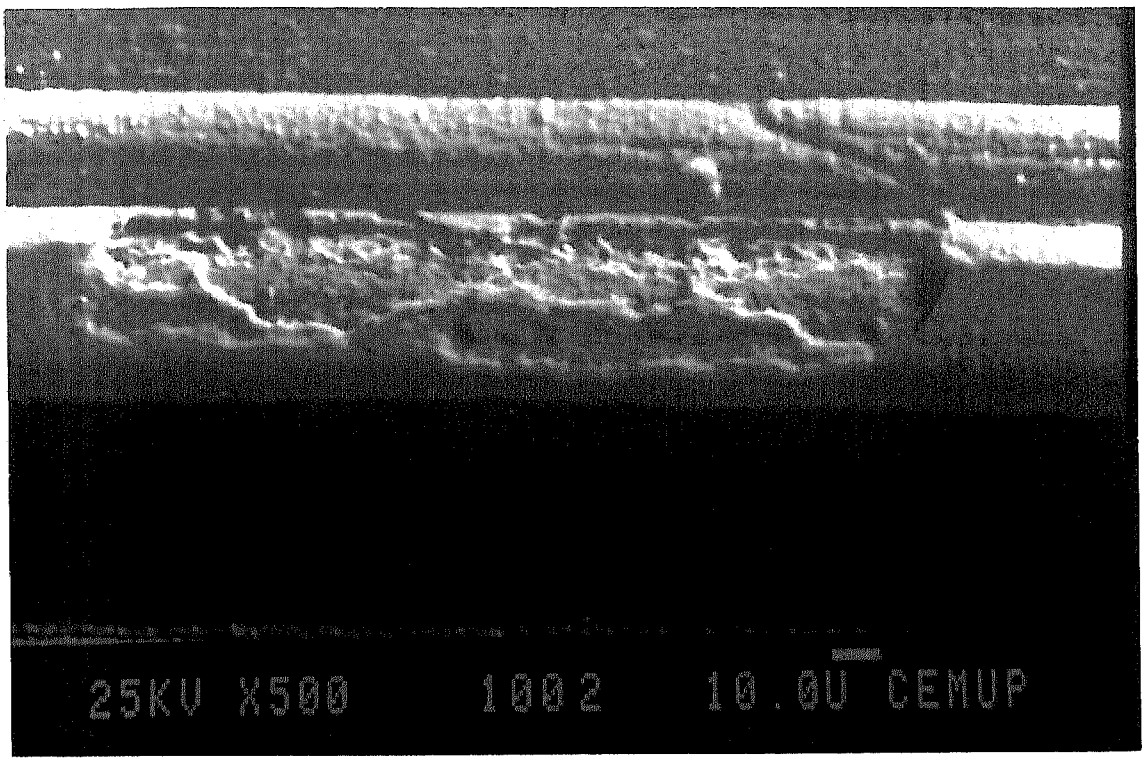


Figura 2.55 - Imagem da fractura ocorrida num pico do patim revestido a (Ti,Zr)N após ter sido posto em contacto com uma pista de TiN em contacto seco a 3 m/s

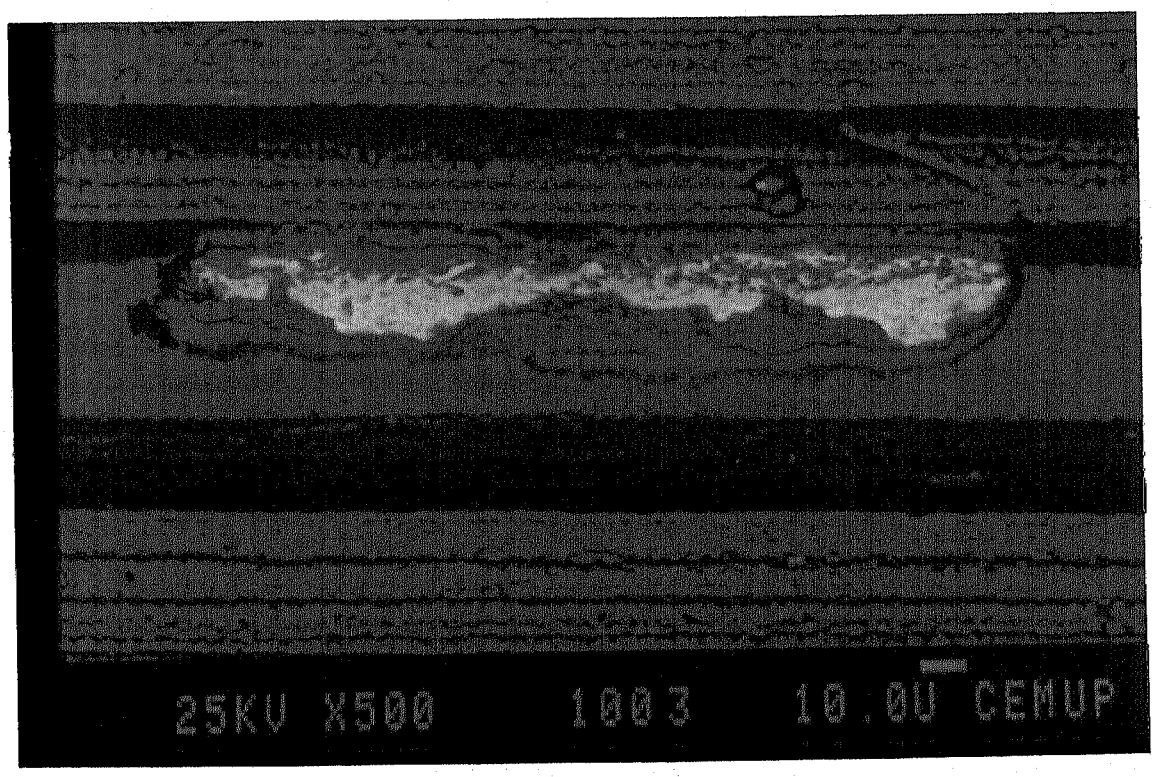


Figura 2.56 - Imagem da mesma zona da foto anterior, obtida com electrões secundário rectro-difundidos, e onde pode ser observada a zona visível do substrato

Sintomas idênticos podem ser observados em relação às pistas. O contacto de patins revestidos com superfícies revestidas, provoca nestas sulcos de baixa profundidade, sem que se verifique rotura do revestimento. No entanto, na zona de fronteira entre o sulco e a zona da pista que esteve isenta de contacto por coincidir com o vale do patim, verificam-se fenómenos idênticos ao anteriormente descrito. Na figura 2.57 poderá ser observado o caso de uma pista revestida a TiN, que esteve em contacto seco com um patim de (Ti,Zr)N, com a velocidade de deslizamento de 3 m/s, que apresenta uma rotura localizada do seu revestimento, com perfuração até ao substrato.

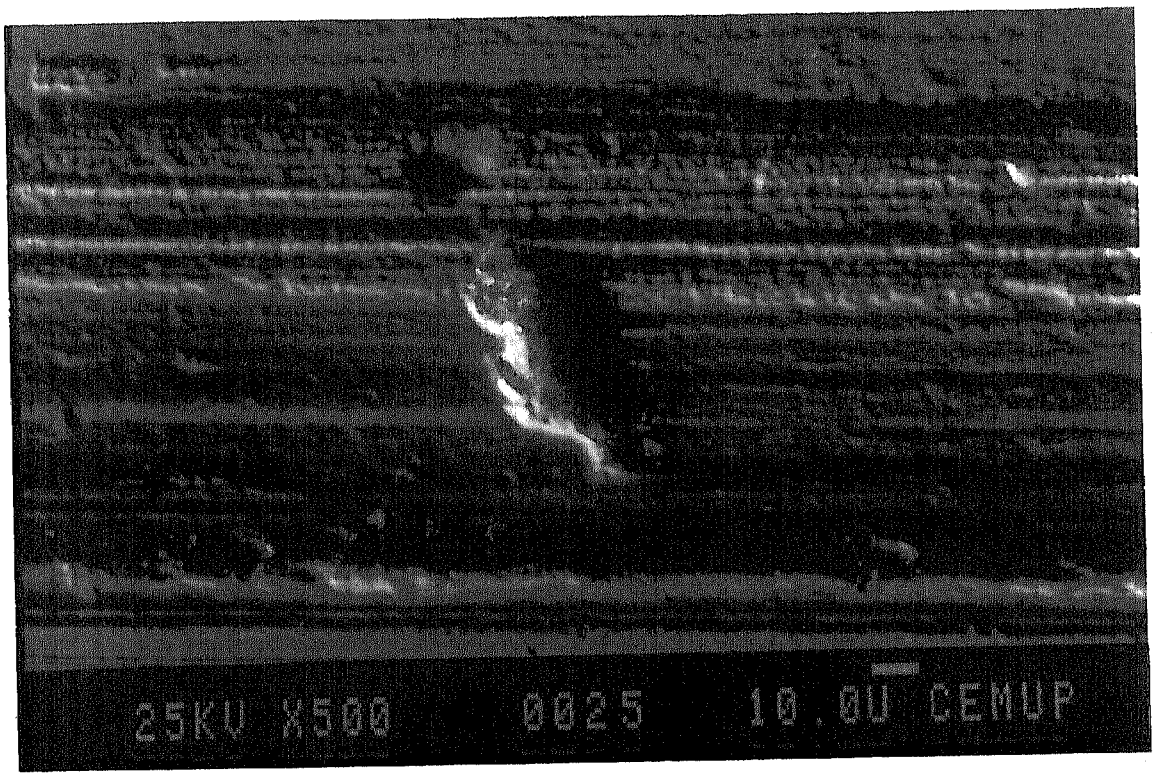


Figura 2.57 - Imagem da rotura localizada do revestimento de uma pista revestida a TiN, na zona de fronteira entre um sulco e uma zona não muito solicitada

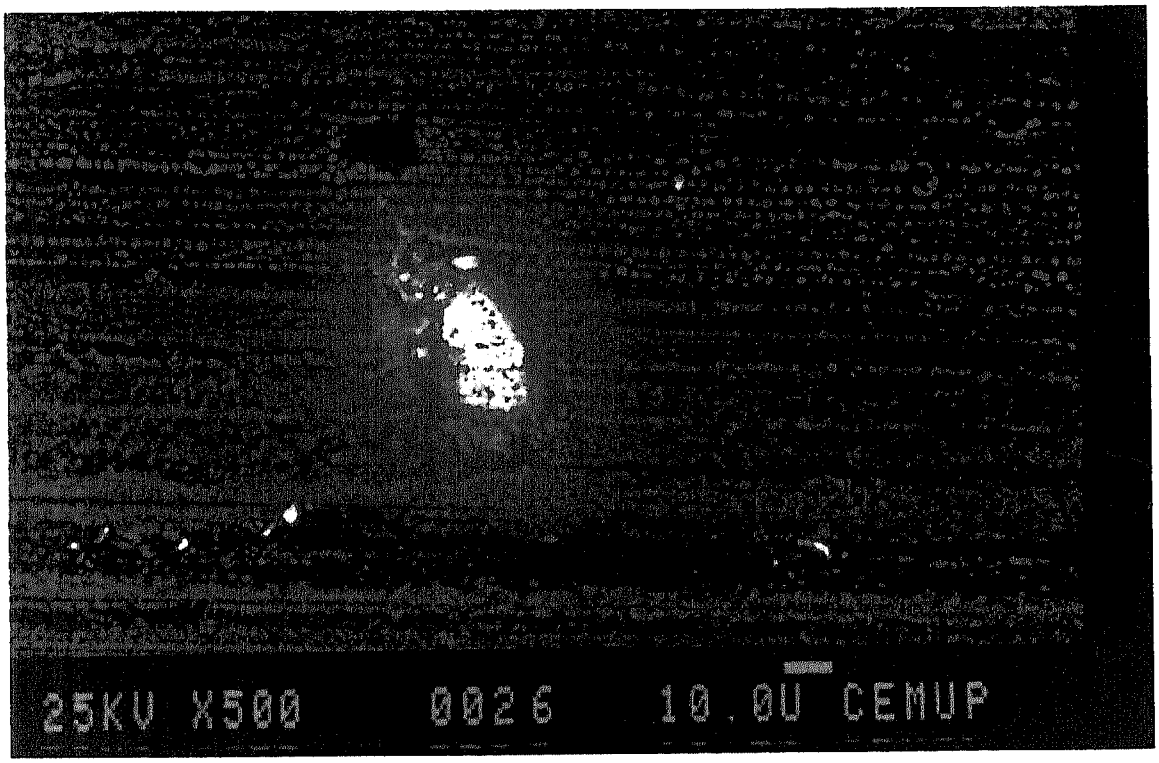


Figura 2.58 - Imagem da mesma zona da foto anterior, obtida com electrões secundários rectro-difundidos, onde se pode observar nitidamente a parte visível do substrato

Para situações de menor solicitação, com a utilização da velocidade de deslizamento de 1 m/s foram detectados fenómenos semelhantes, embora em menor escala. A figura 2.59 ilustra o contacto seco entre uma pista revestida a TiN e um patim revestido a TiN com uma velocidade de deslizamento de 1 m/s. Nesta imagem é possível verificar-se que existe uma deformação plástica do substrato bastante reduzida, tendo dado origem a sulcos muito pouco significativos. A zona de fronteira entre o reduzido sulco e a superfície pouco solicitada está no entanto na origem da nucleação da rotura do revestimento.

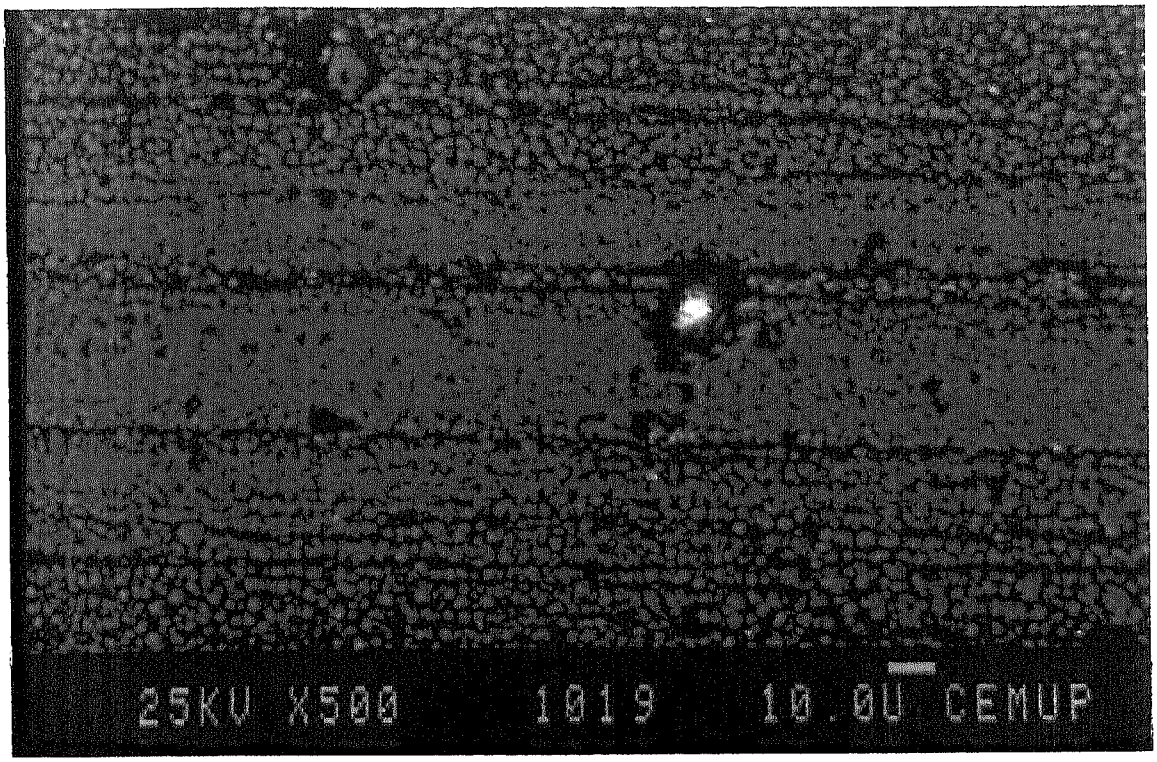


Figura 2.59 - Imagem da superfície de uma pista revestida a TiN que esteve em contacto seco com um patim revestido a TiN com velocidade de deslizamento de 1 m/s, onde pode ser observada a nucleação da rotura do revestimento

Face às observações anteriores, verificamos que no contacto entre superfícies revestidas, existe deformação plástica do substrato que é acompanhada pelo revestimento, dando origem a sulcos na superfície menos rugosa da pista, provocados pelo carga e contacto exercidos pelos picos do patim. É na zona de fronteira entre os sulcos e a parte da superfície menos solicitada correspondente à falta de contacto com os vales do patim, que se vai verificar a nucleação da rotura do revestimento. A rotura do revestimento vai originar a libertação de partículas de dimensão superior às partículas de desgaste libertadas na rodagem. A libertação destas partículas, e o seu transporte ao longo do contacto, vão originar um forte incremento na força de atrito, sendo também a origem de desgaste por abrasão, causado pela presença de um terceiro corpo de elevada dureza.

No caso dos patins, e devido à menor área de suporte, o desgaste inicia-se nos picos, que vão sendo removidos sob a forma de pequenas partículas, que se escoam do contacto normalmente pelo espaço livre deixado pelos vales. Um desgaste mais pronunciado conduz à rotura do revestimento na zona anteriormente ocupada pelos picos.

Seguidamente, e como imagens de referência, apresentam-se fotos relativas ao estado inicial da superfície das pistas após revestimento.

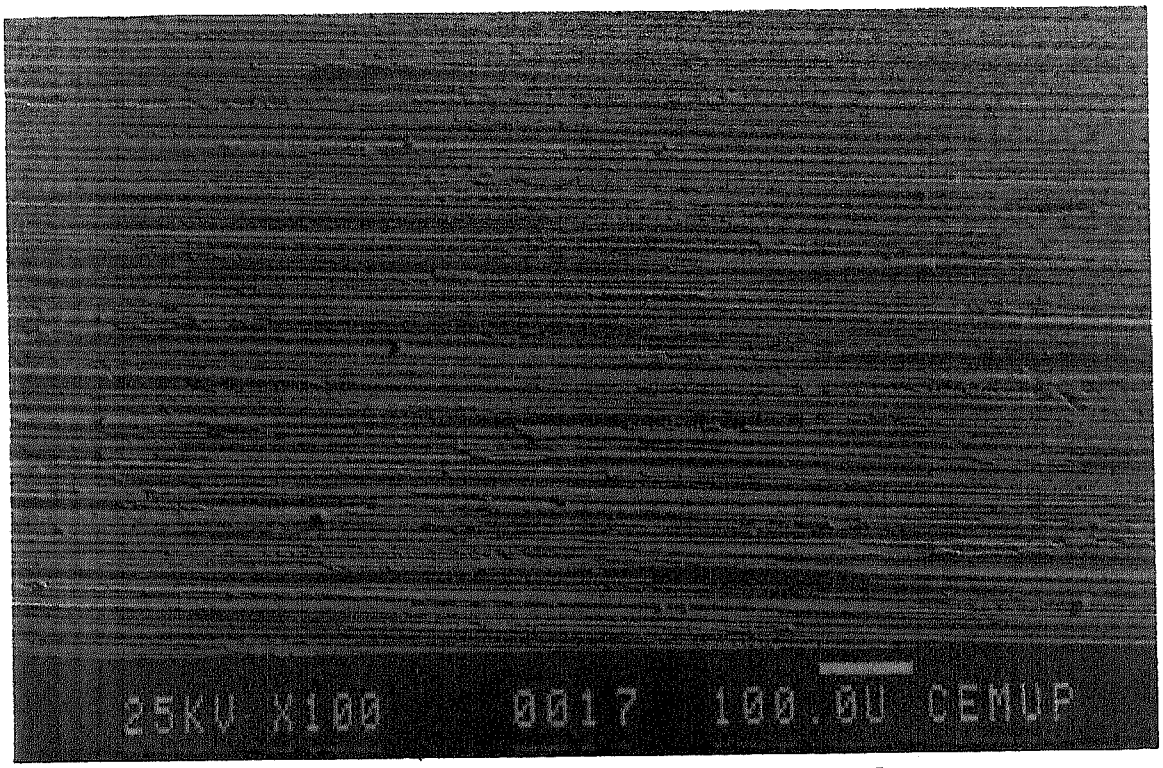


Figura 2.60 - Aspecto da superfície da pista revestida a TiN antes do contacto

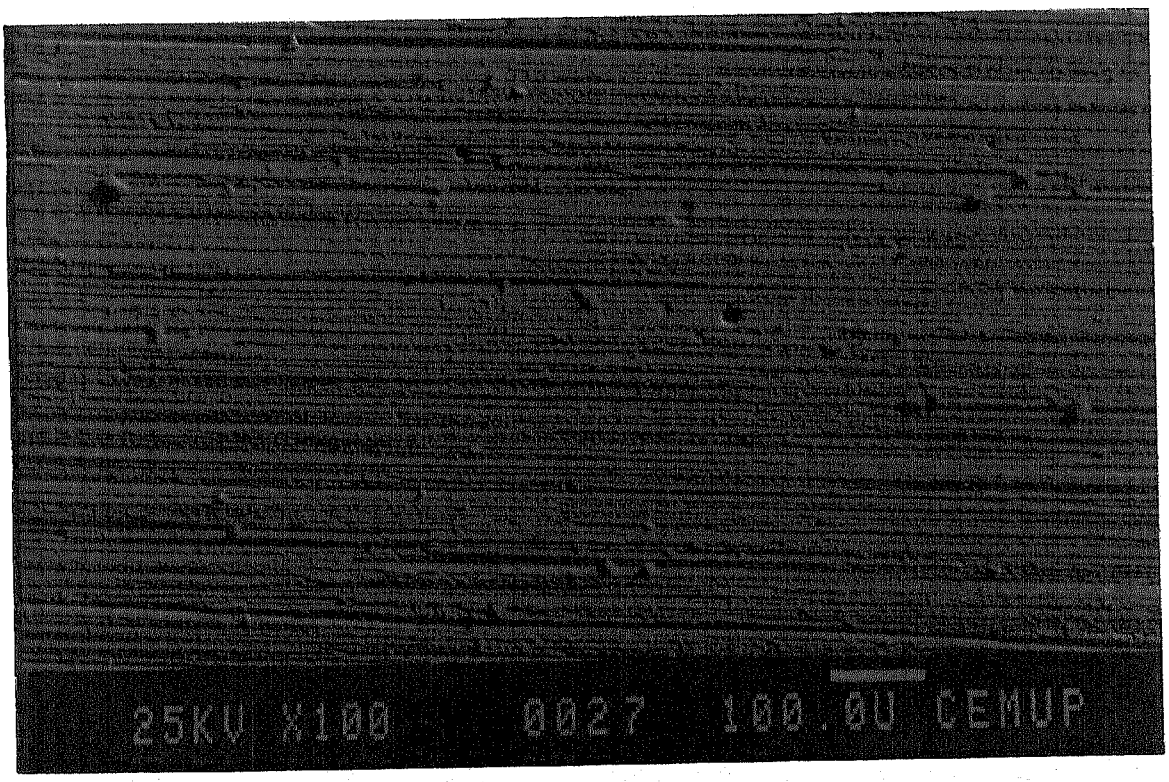


Figura 2.61 - Aspecto da superfície da pista revestida a (Ti,Zr)N antes do contacto

A lubrificação provou melhorar o coeficiente de atrito inicial neste tipo de contacto, não contribuindo no entanto para uma melhoria significativa do seu incremento durante o ensaio. Os mecanismos de desgaste verificados neste tipo de contacto são idênticos aos observados nos contactos secos, apresentando no entanto níveis de desgaste menores. A influência da lubrificação foi mais eficaz nos contactos entre uma superfície não revestida e outra revestida.

No contacto entre uma superfície não revestida e uma superfície revestida, os fenómenos verificados diferem significativamente daqueles que se verificam entre superfícies revestidas. A superfície não revestida , devido à diferença de dureza que possui em relação à superfície revestida, degrada-se muito mais rapidamente. O material que se liberta da superfície não revestida, sendo mais macio, vai formar películas de óxidos de ferro sobre a superfície revestida. O tamanho, forma e frequência de formação e libertação dessas películas vai depender da dureza e estrutura da superfície oposta, e da velocidade de deslizamento de uma superfície sobre a outra.

A velocidade de deslizamento, tanto em contactos secos como lubrificados, mostrou ter alguma influência no nível de desgaste verificado nos ensaios. De facto, a análise do quadro/resumo dos resultados atrás apresentado já evidenciava, em geral, um aumento do desgaste com o aumento da velocidade. As figuras seguintes, ilustram a diferença de aspecto das superfícies de um mesmo revestimento com o aumento da velocidade, mantendo constantes as restantes condições de ensaio.

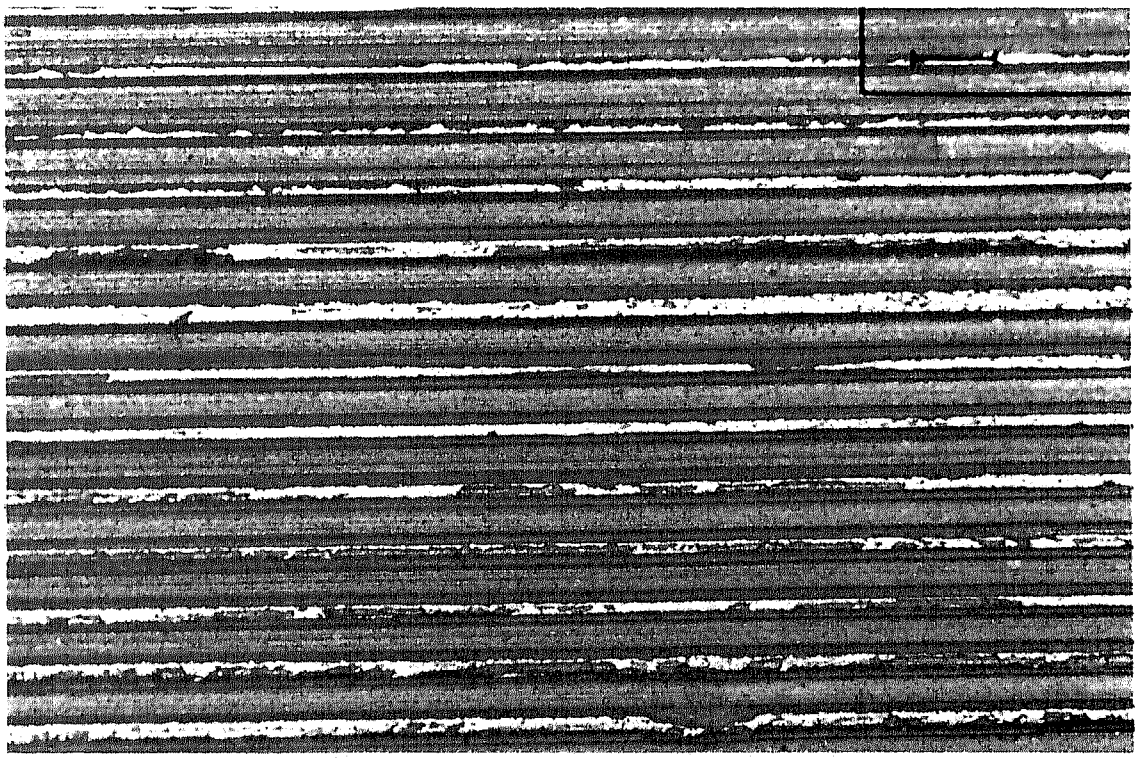


Figura 2.62 - Imagem da superfície do patim revestido a ZrN que esteve em contacto de deslizamento seco com uma pista revestida a TiN à velocidade de 1 m/s

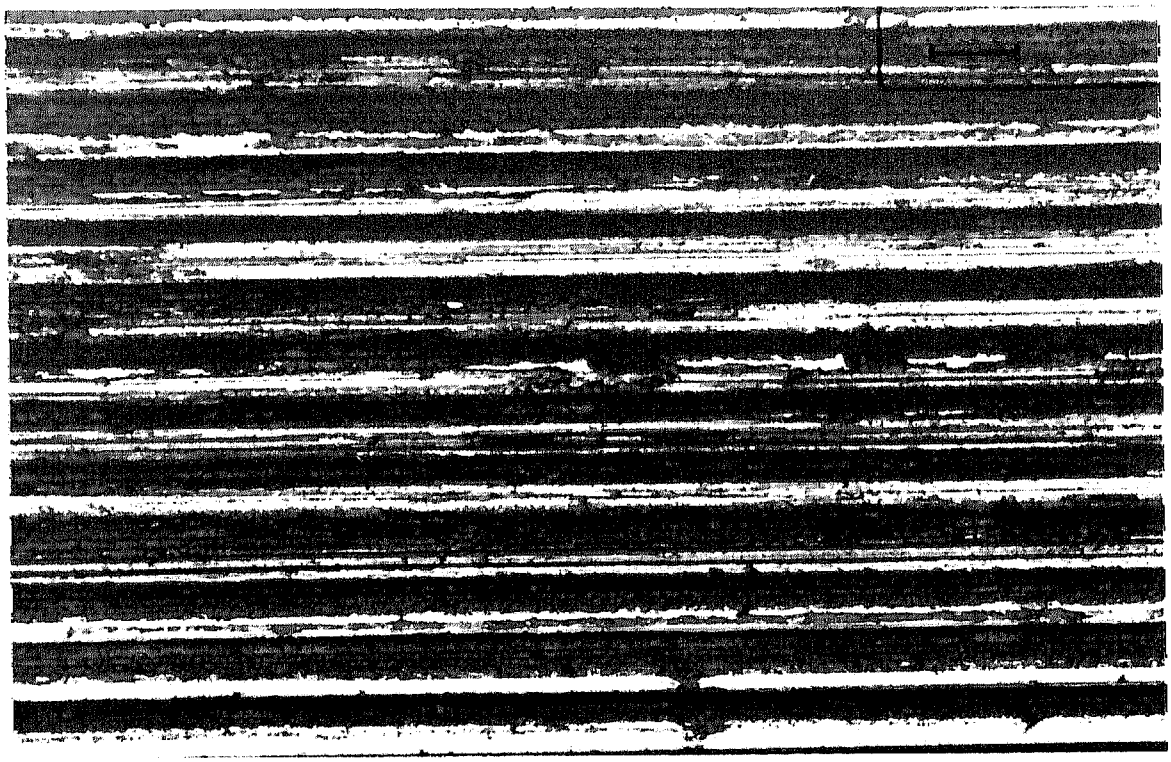


Figura 2.63 - Imagem da superfície do patim revestido a ZrN que esteve em contacto de deslizamento seco com uma pista revestida a TiN à velocidade de 3 m/s

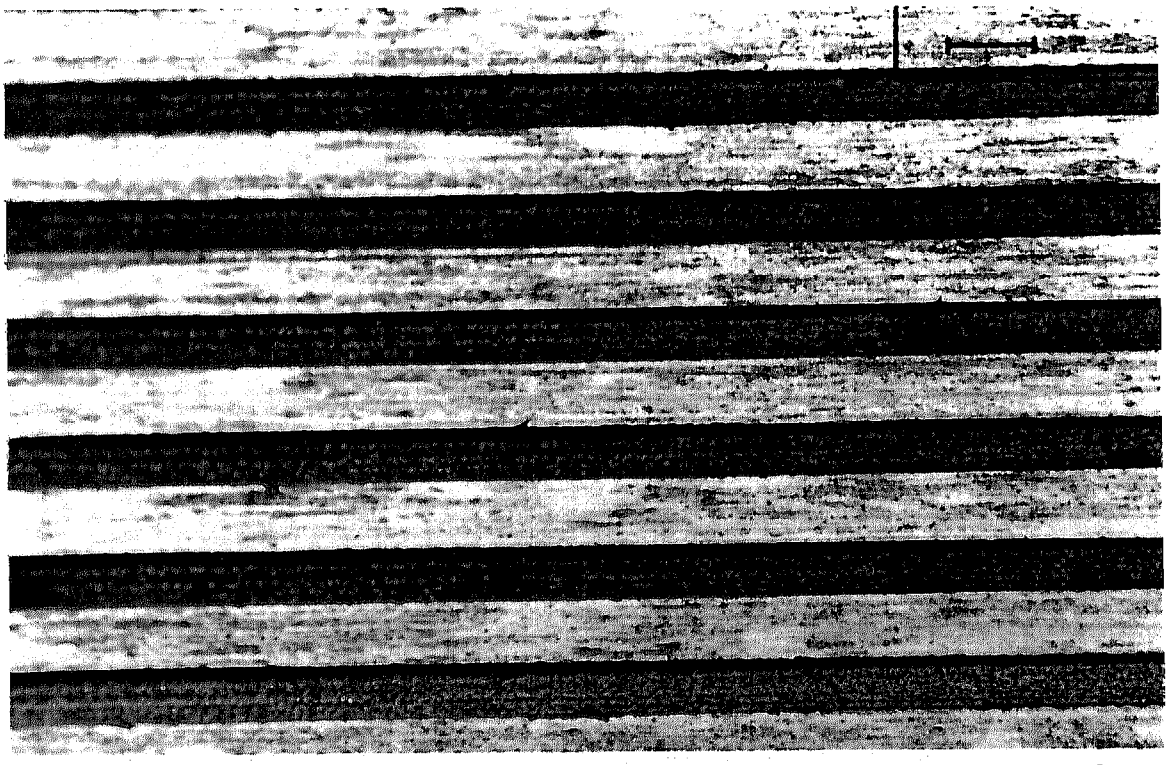


Figura 2.64 - Imagem da superfície do patim não revestido que esteve em contacto de deslizamento seco com uma pista revestida a TiN à velocidade de 1 m/s

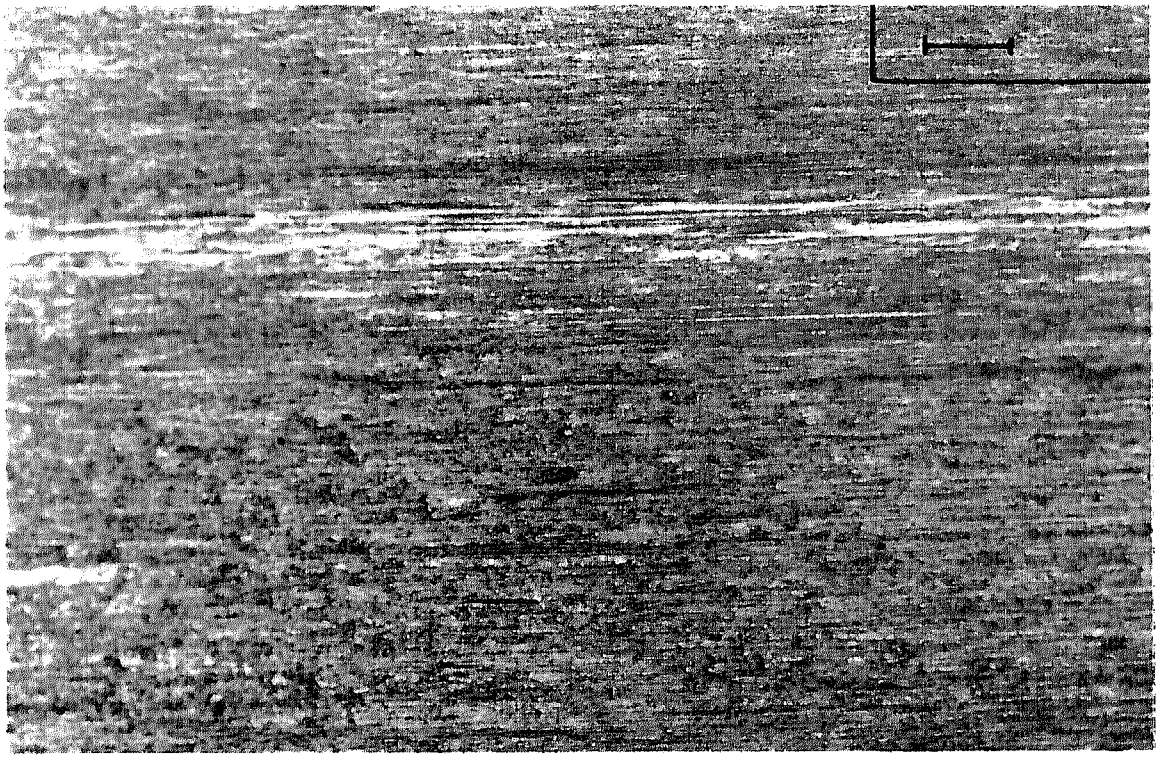


Figura 2.65 - Imagem da superfície do patim não revestido que esteve em contacto de deslizamento seco com uma pista revestida a TiN à velocidade de 3 m/s

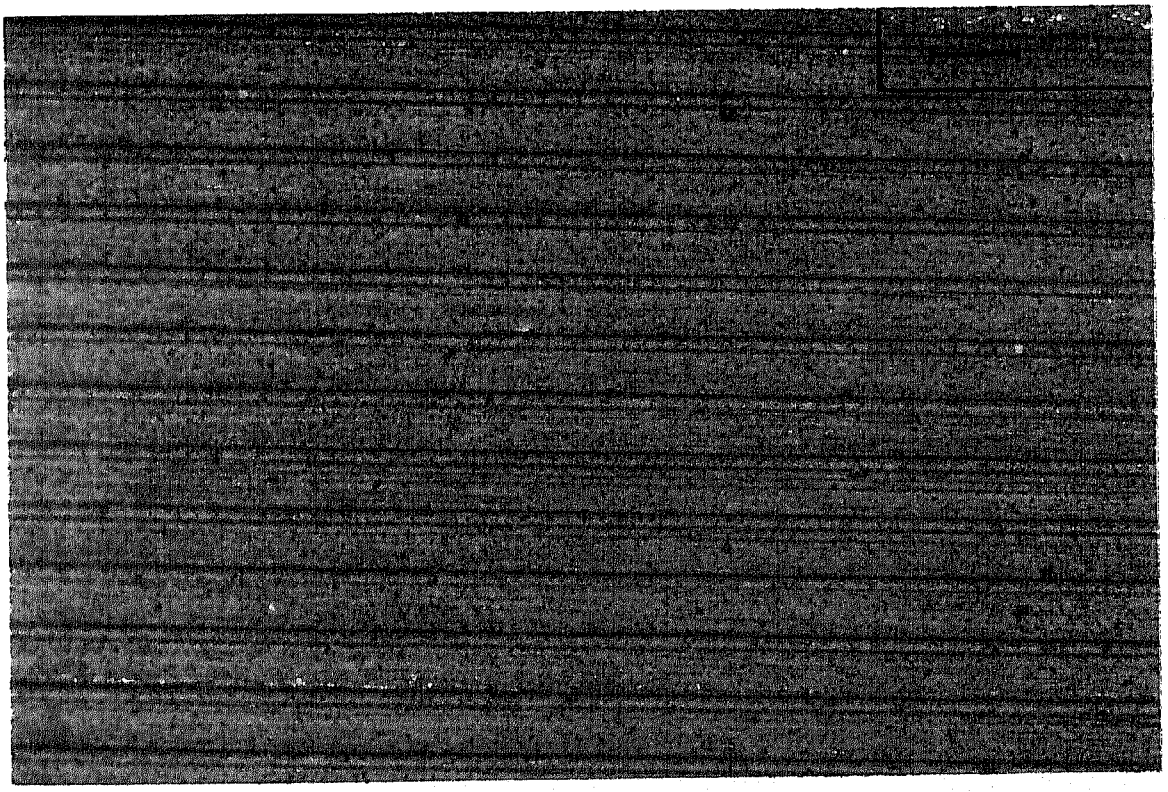


Figura 2.66 - Imagem da superfície do patim revestido a (Ti,Zr)N que esteve em contacto lubrificado com uma pista revestida a TiN à velocidade de 1 m/s

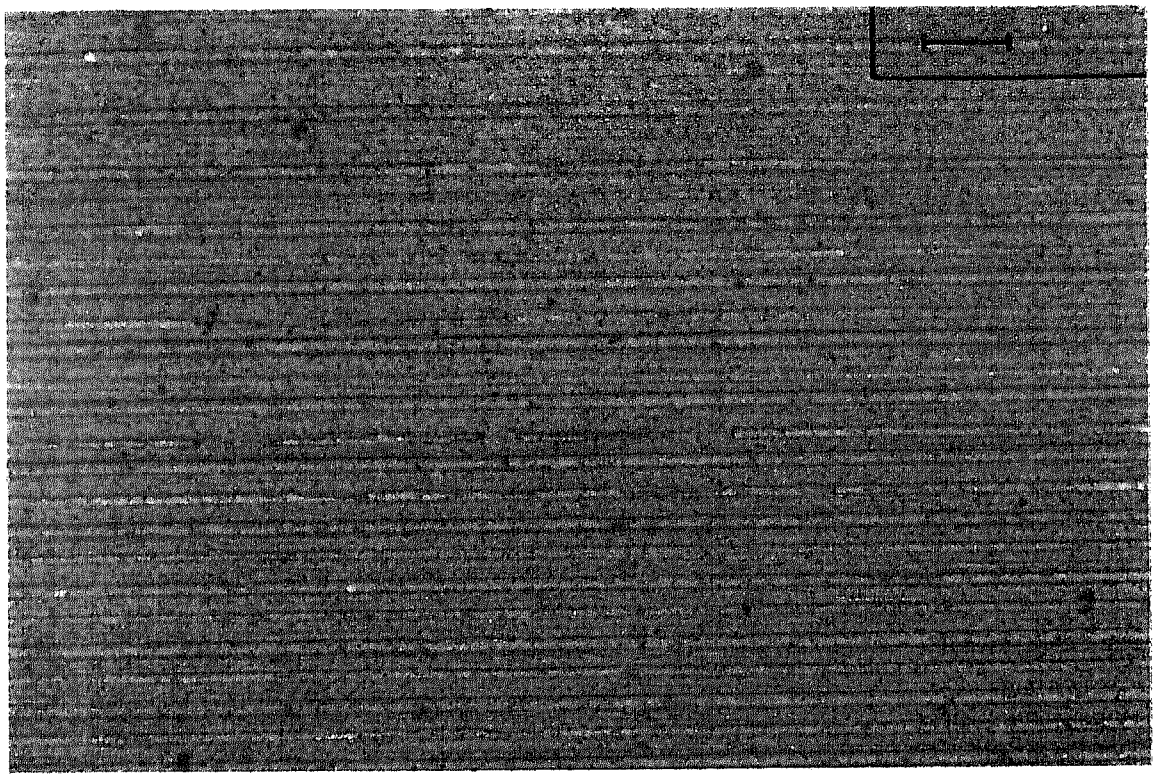


Figura 2.67 - Imagem da superfície do patim revestido a (Ti,Zr)N que esteve em contacto lubrificado com uma pista revestida a TiN à velocidade de 3 m/s

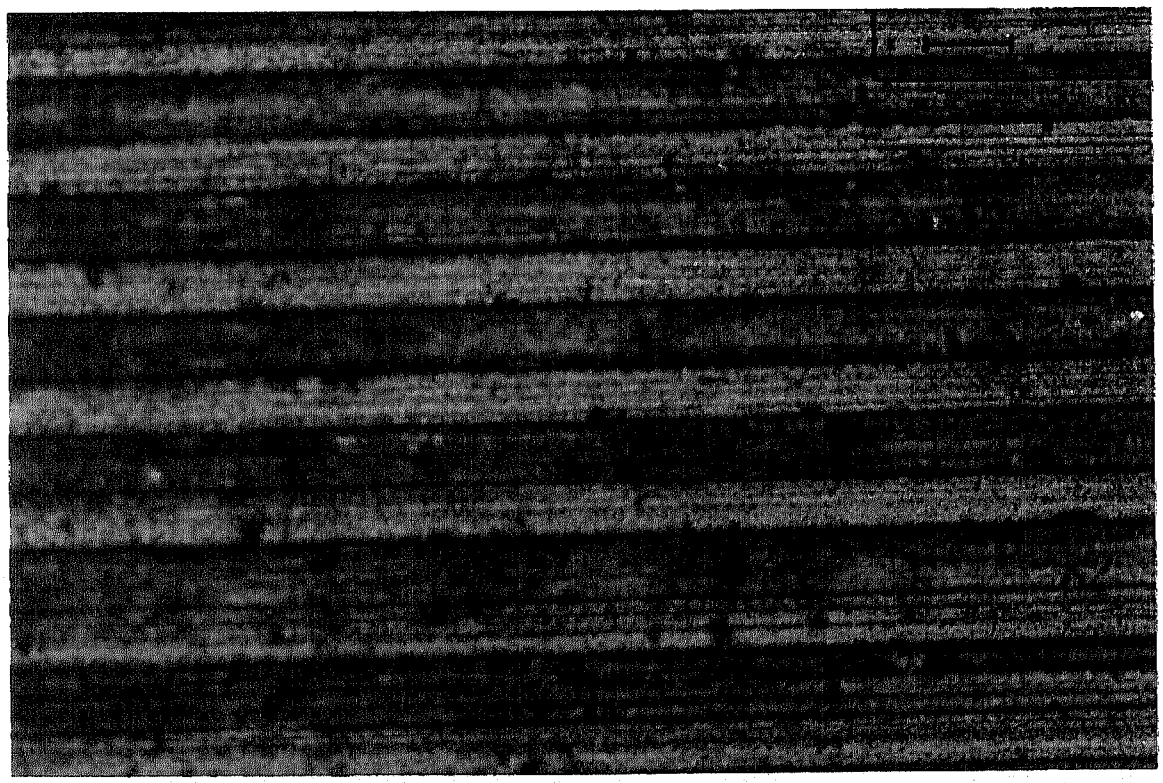


Figura 2.68 - Imagem da superfície do patim revestido a TiN que esteve em contacto lubrificado com uma pista revestida a ZrN à velocidade de 1 m/s

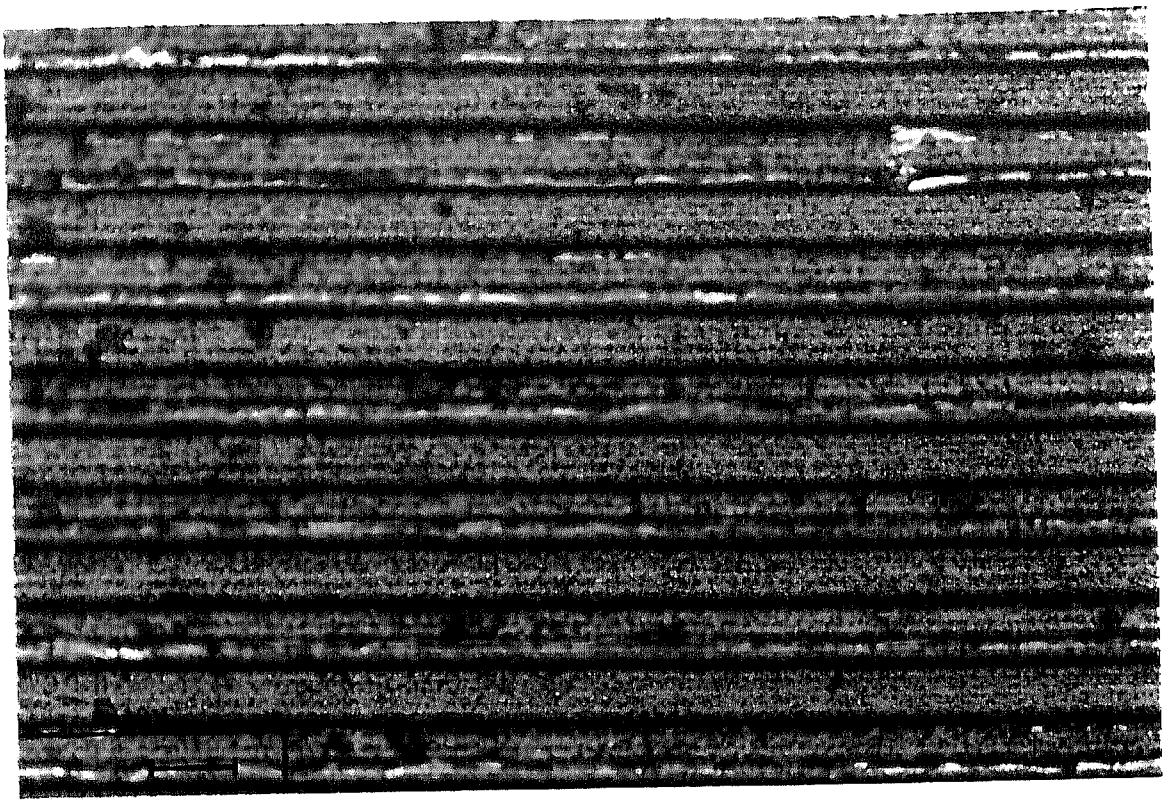


Figura 2.69 - Imagem da superfície do patim revestido a TiN que esteve em contacto lubrificado com uma pista revestida a ZrN à velocidade de 3 m/s

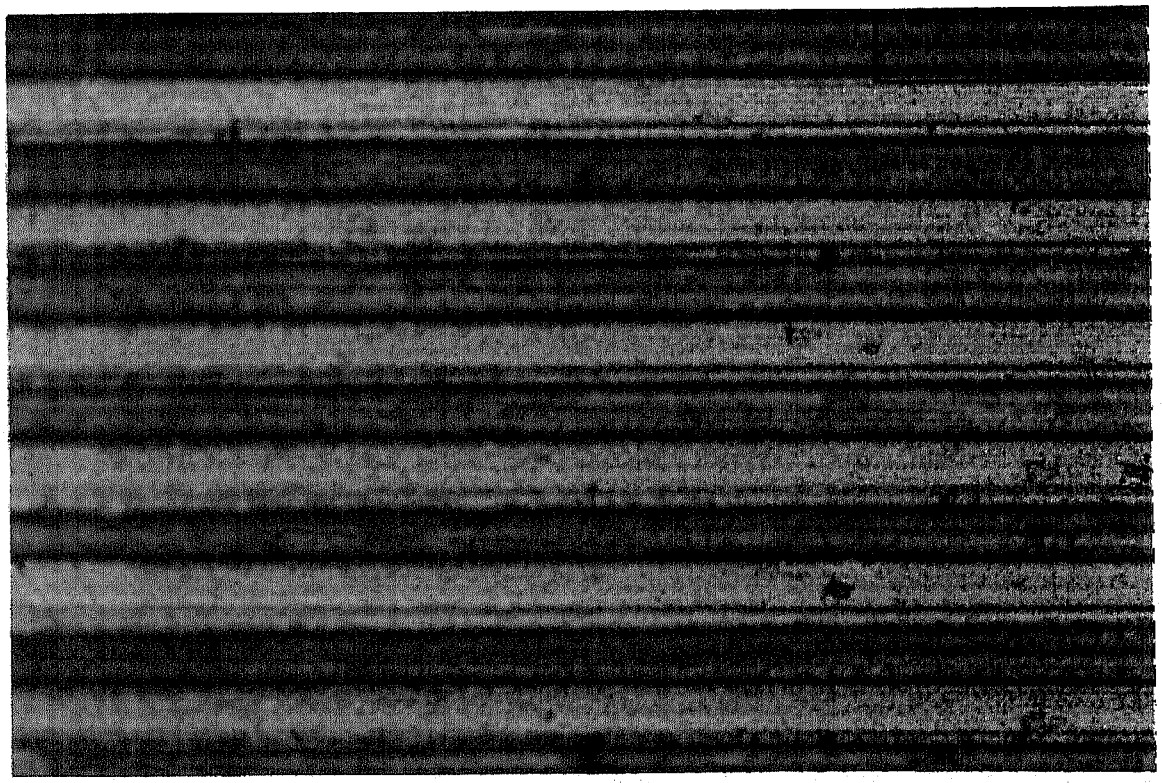


Figura 2.70 - Imagem da superfície do patim revestido a TiN que esteve em contacto lubrificado com uma pista revestida a (Ti,Zr)N à velocidade de 1 m/s

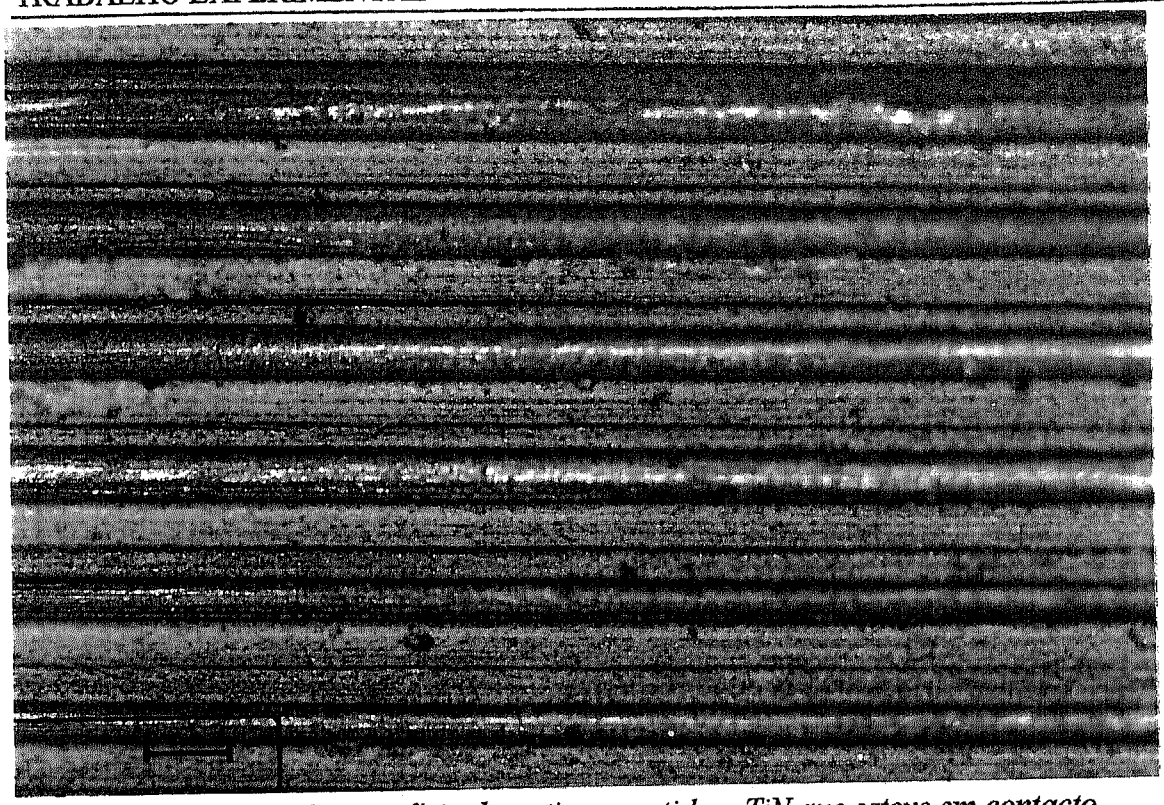


Figura 2.71 - Imagem da superfície do patim revestido a TiN que esteve em contacto lubrificado com uma pista revestida a (Ti,Zr)N à velocidade de 3 m/s

Seguidamente são apresentadas imagens que pretendem ilustrar a diferença no aspecto que as superfícies dos patins apresentaram após ensaio, sujeitas às mesmas condições de contacto.

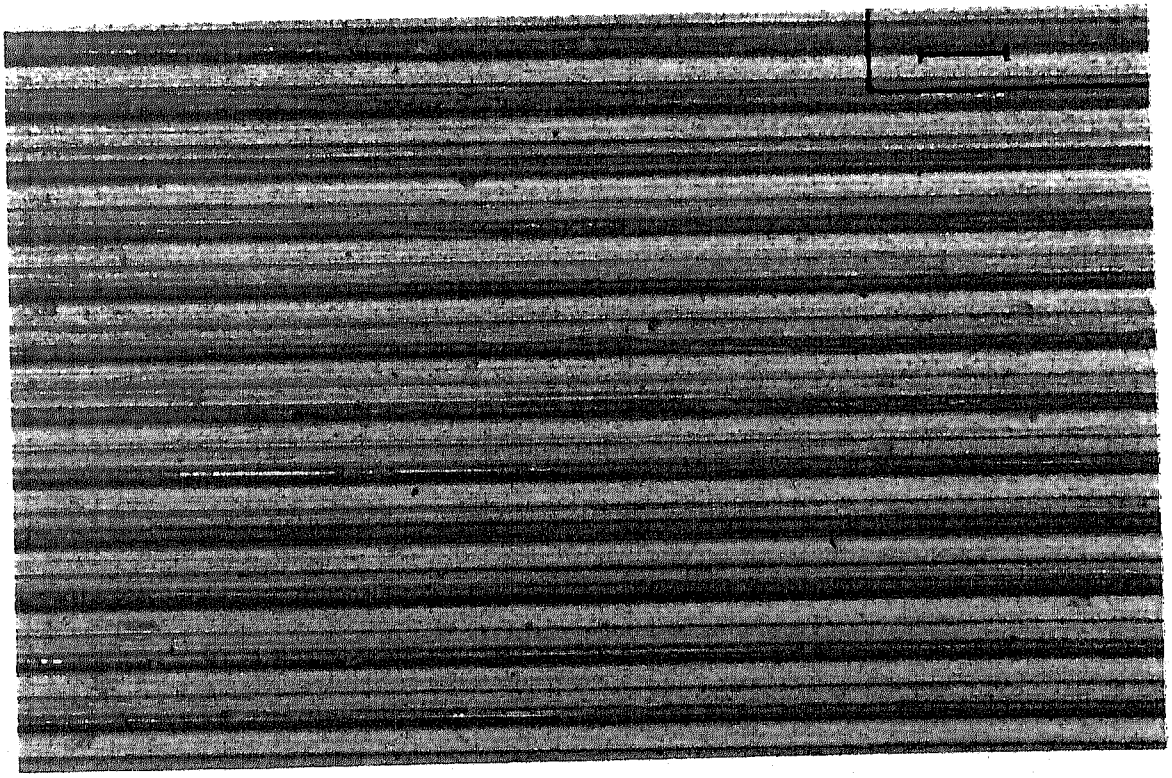


Figura 2.72 - Imagem da superfície do patim revestido a TiN que esteve em contacto seco com uma pista não revestida, à velocidade de 3 m/s

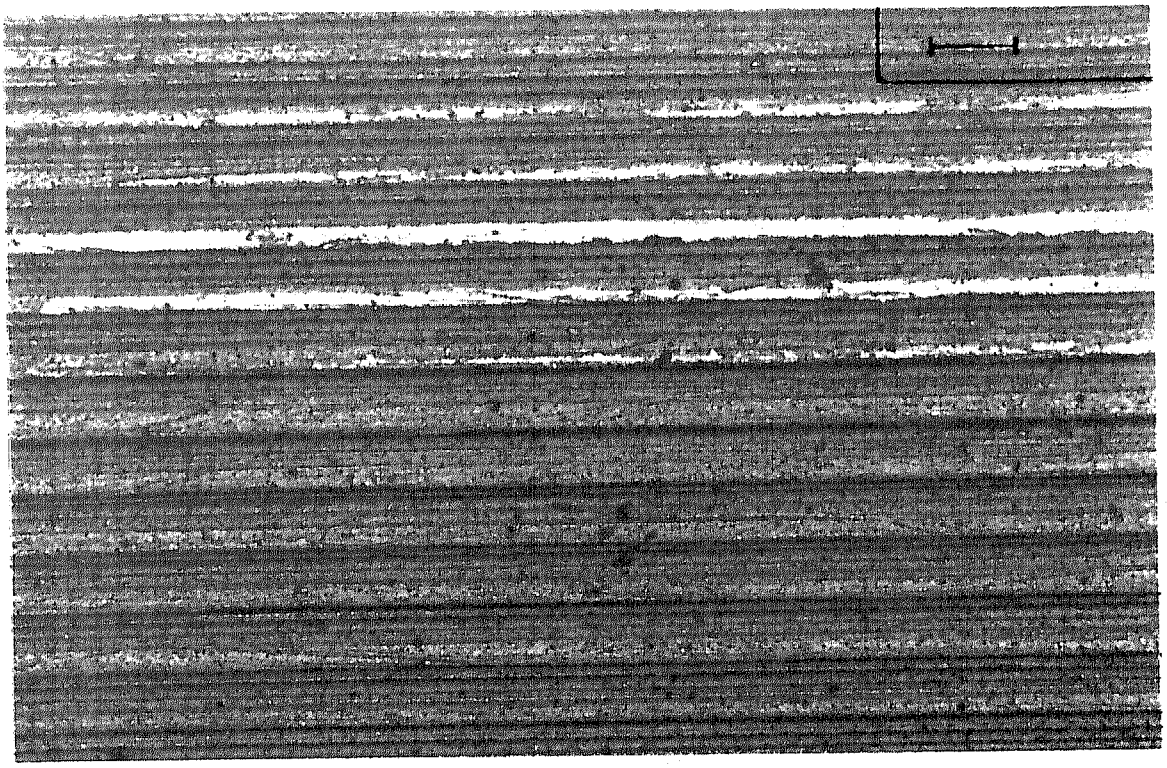


Figura 2.73 - Imagem da superfície do patim revestido a ZrN que esteve em contacto seco com uma pista não revestida, à velocidade de 3 m/s

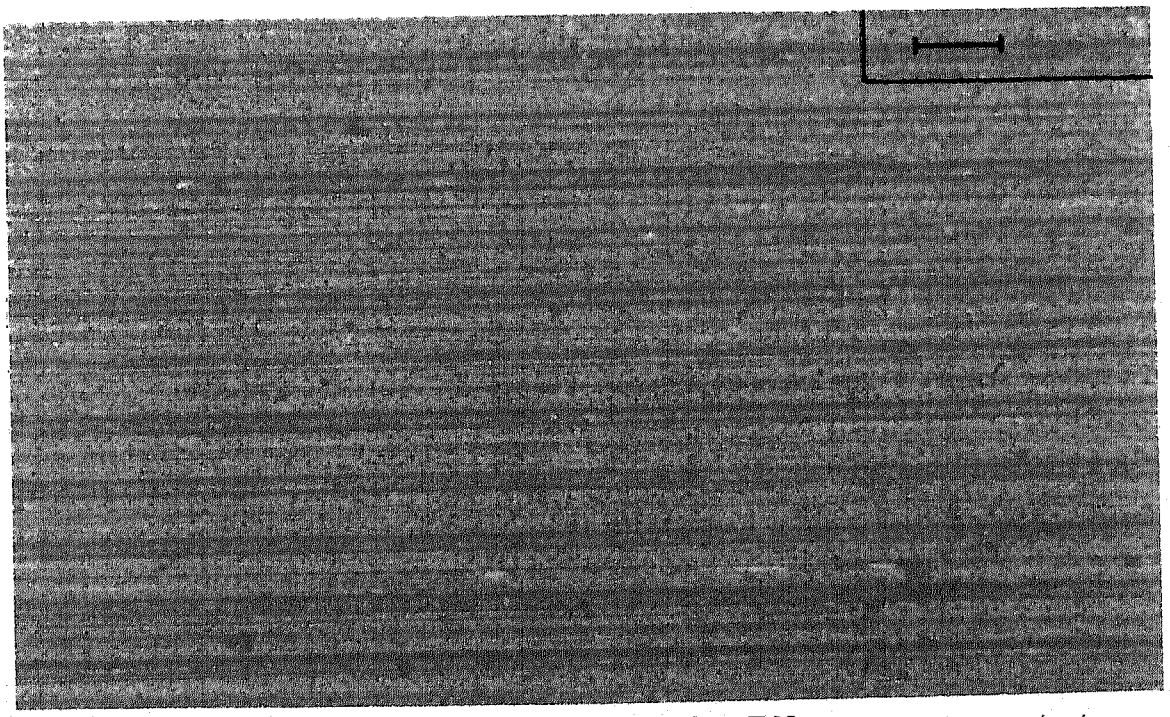


Figura 2.74 - Imagem da superfície do patim revestido a TiN que esteve em contacto seco com uma pista não revestida, à velocidade de 1 m/s

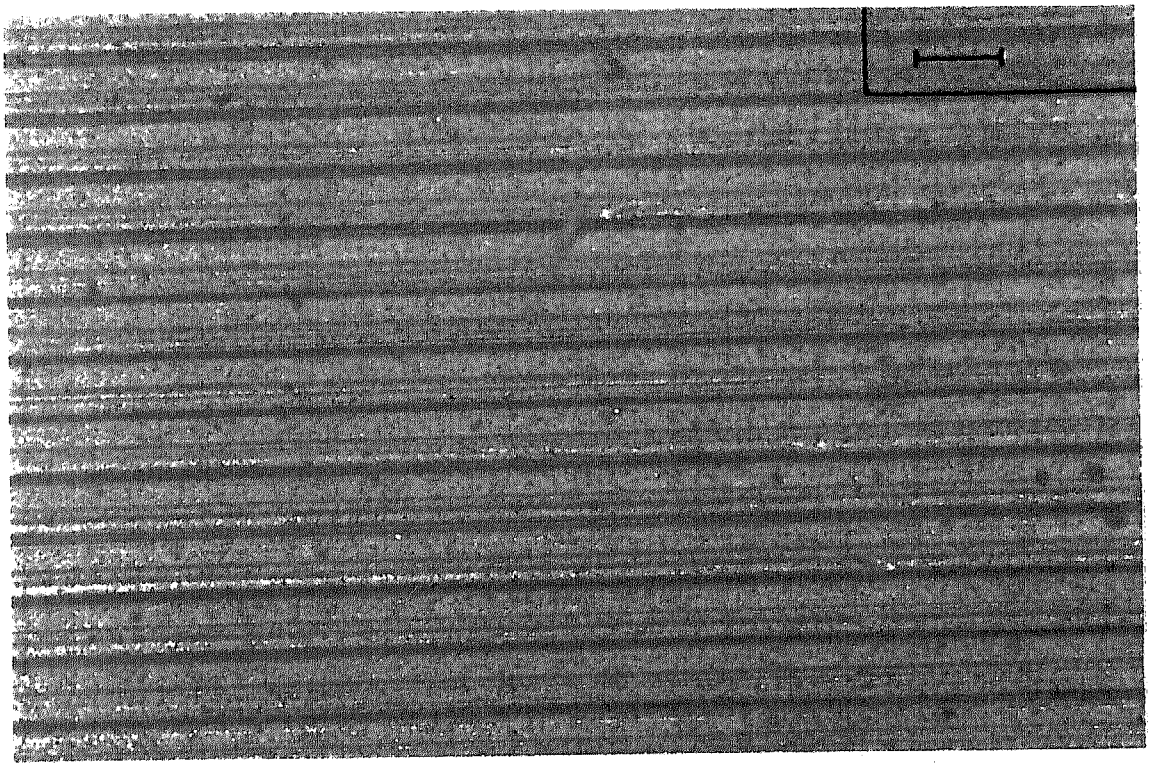


Figura 2.75 - Imagem da superfície do patim revestido a (Ti,Zr)N que esteve em contacto seco com uma pista não revestida, à velocidade de 1 m/s

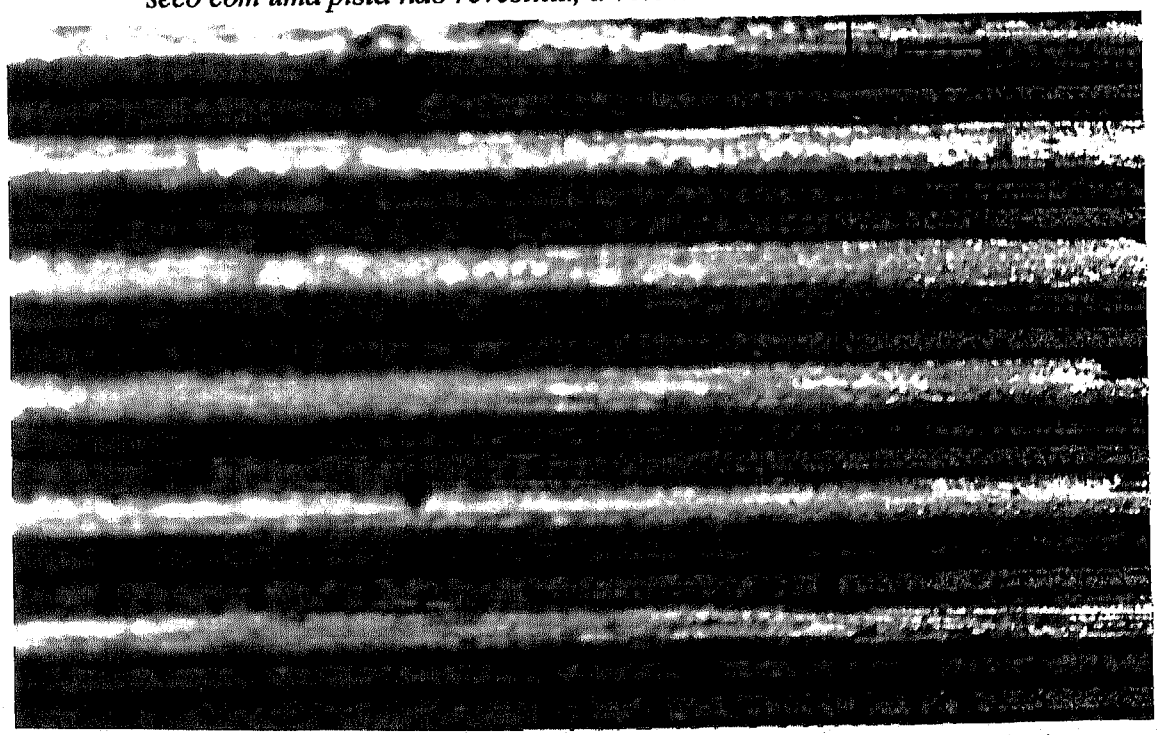


Figura 2.76 - Imagem da superfície do patim não revestido que esteve em contacto lubrificado com uma pista de (Ti,Zr)N, à velocidade de 3 m/s



Figura 2.77 - Imagem da superfície do patim revestida a (Ti,Zr)N que esteve em contacto lubrificado com uma pista de (Ti,Zr)N, à velocidade de 3 m/s

Deve ainda referir-se que a observação de zonas de rotura nas imagens das superfícies revestidas anteriormente apresentadas não pode ser analisada de forma linear, nem tem relação directa com a perda de massa registada, devido ao facto de haverem três espessuras de revestimento diferentes em estudo, e da porosidade da película de revestimento condicionar a sua densidade e, consequentemente, a massa perdida pela superfície.

Constatou-se ainda que qualquer pequeno defeito do revestimento origina normalmente nucleação de rotura do revestimento, podendo ainda dar origem a desgaste por abrasão, causado por partículas de maiores dimensões que se libertam do revestimento.

No capítulo seguinte são apresentadas as conclusões deste trabalho.

3. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

3.1 Conclusões

Face aos resultados obtidos no trabalho experimental e apresentados no capítulo anterior, poderemos concluir que :

1. As superfícies revestidas apresentaram um comportamento francamente superior à superfície de aço C220 com nitruração iónica no que respeita ao desgaste.
2. Na gama de revestimentos estudados, o TiN apresentou o menor desgaste, seguido do (Ti,Zr)N que apresentou um comportamento semelhante. O revestimento de ZrN foi aquele que apresentou pior comportamento no lote das superfícies revestidas estudadas.

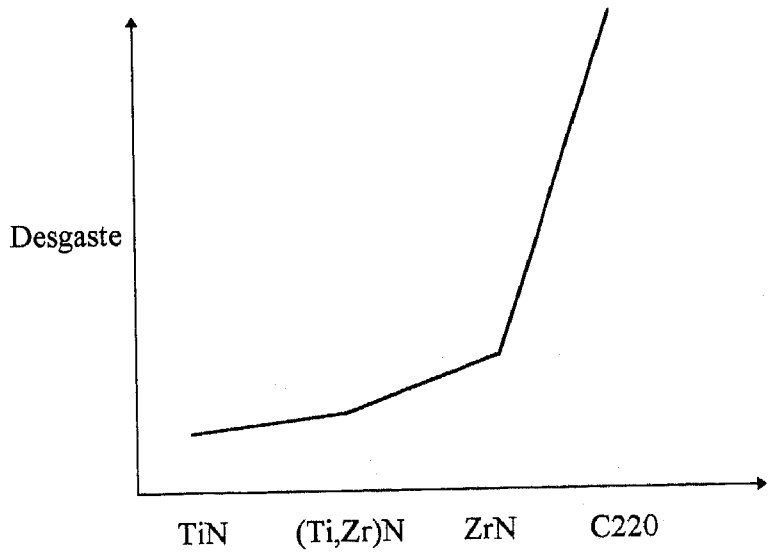


Figura 3.1 - Gráfico de tendência relativo à perda de massa das superfícies ensaiadas

3. Os níveis de desgaste em contacto não lubrificado das superfícies revestidas foram, em alguns casos, inferiores aos níveis de desgaste apresentados pelas superfícies não revestidas em contactos lubrificados.
4. A introdução de lubrificação nos contactos provocou uma diminuição geral dos níveis de desgaste.
5. O coeficiente de atrito registados nos contactos entre superfícies não revestidas e superfícies revestidas apresentou sempre valores superiores aos coeficientes de atrito registados nos contactos entre superfícies revestidas.

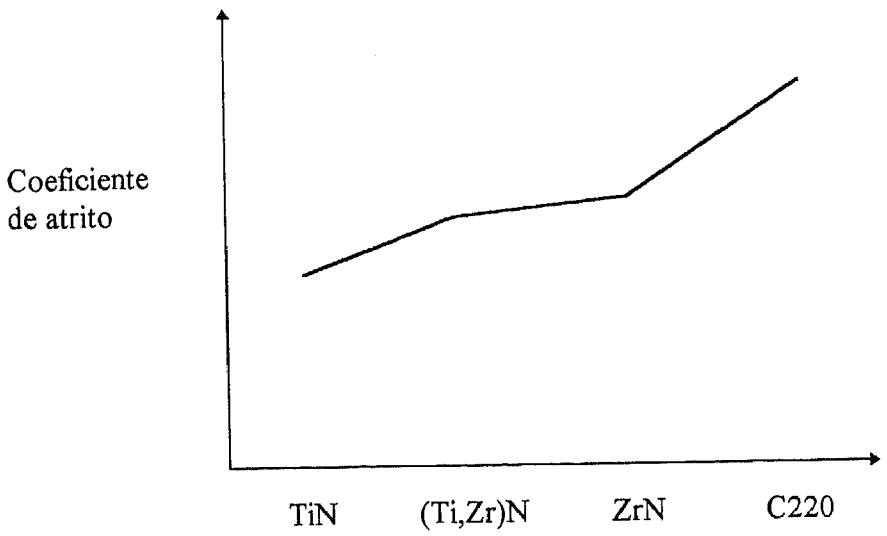


Figura 3.2 - Gráfico de tendência relativo ao coeficiente de atrito registado pelas superfícies ensaiadas

6. O efeito da lubrificação fez-se sentir nos valores do coeficiente de atrito registados em ensaios lubrificados, face aos valores obtidos nos ensaios não lubrificados.
7. O incremento do coeficiente de atrito verificados nos ensaios não lubrificados, não foi melhorado de forma significativa pela introdução da lubrificação.

3.2 - Propostas para futuros trabalhos

A realização deste trabalho permitiu estabelecer termos de comparação entre diferentes tipos de revestimento, quando sujeitos às mesmas condições de contacto. No entanto, muitas outras vertentes ficaram por explorar.

Nesse sentido, são seguidamente propostos alguns trabalhos neste campo, que poderão contribuir para um melhor conhecimento de todos os mecanismos de desgaste presentes nestes tipos de contacto.

- Estudo de novas ligas nas mesmas condições de contacto.
- Estudo da influência da rugosidade das superfícies no desgaste e no coeficiente de atrito registado, para as mesmas condições de ensaio.
- Estudo do desgaste de cada tipo de revestimento em função da temperatura de trabalho.
- Estudo da influência da espessura da película depositada nos mecanismos de desgaste verificados ao longo dos ensaios.

REFERÊNCIAS

BERGHAUS, B., Improvements in and related to the coating of articles by means of thermally vapourized material, UK Patent specification 510992 (1983)

BERTHIER, Y., GODET, M & BRENDLE, M., Velocity accommodation in friction, Tribology Trans., 32 (1989) 4, 490-496

BHUSHAN, B. & KENNEDY, F.E., Handbook of Tribology - Materials, Coatings and Surface Treatments, McGraw-Hill Inc., New York (1991) 1168 p.

BULL, S.J. & RICKERBY, P.R., Compositional, microstructural and morphologic effects on the mechanical and tribological properties of chromium nitrogen films. Surface and Coatings Technology, 43/44 (1990), 732-734

BURNETT, P.J. & RICKERBY, D.S., The mechanical properties of wear-resistant coatings I: Modelling of hardness behaviour, Thin Solid Films, 148 (1987) 41-50

CARLLSON, J.-O., Thermally activated chemical vapour deposition. In: Advanced surface coatings: A handbook in surface engineering. Rickerby, D.S. & Matthwes, A. (Eds), Blackie, Glasgow, UK, 1991, 162-193

COOL, B.F., SATHRUM, P., AHARONOV, R., PEYRE, J.P. & BENMALEK, M., Tribologic properties and oxidation resistance of graded (Ti,Al)N coatings. 19th Int. Conf. Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 92), San Diego, USA, 6-10.2.1992, 20p.

FAYEULLE, S., EHNI, P.D., & SINGER, I.L., Role of transfer films in wear of MoS_2 coatings. In: Mechanics of coatings. Dowson, D. Et al. Eds, Tribology series 17, Elsevier, Amsterdam, 1990, 129-138

FRANKLIN, S.E. & BEUGER, J., A comparison of the tribological behaviour of several wear-resistant coatings. Surface and Coatings Technology, 54/55 (1992) 459-465

GARDOS, M.N., & RAVI, K.V., Tribological behaviour of CDV diamond films. 1st Symp. On Diamond and Diamondlike films, The Electrochemical Society, Los Angeles 7-12.5.1989, 19 p.

GEE, M.G. & McCORMICK, The application of confocal scanning microscopy to the examination of ceramic wear surfaces. J. Phys. D: Appl. Phys., 25 (1992) A230-A235

GHOSH, S.K.& KOHELER, M.S., Study of the relative wear and abrasion resistance of Ti(C,N) and TiN coatings. Surface and Coatings Technology, 54/55 (1992) 466-469

HABIG, K.H., Friction and wear of sliding couples coated with TiC, TiN, or TiB_2. Surface and Coatings Technology, 42 (1990) 133-147

HABIG, K.H., EVERS, W. & HINTERMANN, H.E., Tribologische Prufungen an Oberflächenschichten aus Titancarbid, Titannitrid, Chromcarbid und Eisenborid. Z. Werkstofftech., 11 (1980) 182-190

HALLING, Hans, New Nordic Techology 3-95 p. 4 (1995)

HINTERMANN, H.E., Tribological and protective coatings by chemical vapour deposition. Thin Solid Films, 84 (1981) 1, 215-243

HOLMBERG, K., RONKAINEH, H. & MATTHEWS, A., wear mechanism of coated sliding surfaces. In: Thin films in tribology. Proc. 19th Leeds-Lyon Symp. On Tribology, 8-11.9.1992, Leeds, UK, Elsevier, 1992, 9.p

JAMAL, T., NIMMAGDDA, R. & BUNSHAH, R.F., Friction and adhesive wear of titanium carbide and titanium nitride coatings, Thin Solid Films, 73 (1980) 245-254

KOKNER et al. Technische Akademie Esselinger, 10th International Colloquium, 9-11.01.96

MATERIAL RESEARCH CORPORATION, "Sputtering", 1990

MATTHEWS, A., JAMES, A.S., LEYLAND, A., FANCEY, K.S., VALLI, J., & STAINSBY, J.A., Tribological characterisation of some second generation ceramic coatings deposited by ionisation-assisted physical vapour deposition. Ins. Mech. Eng. C163/87 (1987) 637-642

MIYAKE, S., Tribological properties of hard carbon films: extremely low friction mechanism of amorphous hydrogenated carbon films and amorphous hydrogenated SiC films in vacuum. Surface and Coatings Technology, 54/55 (1992) 563-569

MIYOSHI, K., Plasma-deposited amorphous hydrogenated carbon films and their tribological properties. NASA Technical Memorandum 102379 (1989) 12 p.

PEEBLES, D.E. & POPE, L.E., Reactive evaporation of thin titanium nitride films in ultrahigh vacuum and their friction and wear behaviour as a function of contacts stress. Thin Solid Films, 173 (1989) 19-37

RANDHAWA, H., Review of plasma-assisted deposition processes. 17th Int. Conf. On Metallurgical Coatings and Thin Films, San Diego, USA, 2-6.4.1990, 16p.

RIBEIRO, Tomé, Revestimentos duros produzidos em fase de vapor: vantagens para o utilizador (1995)

RICKERBY, D.S. & BURNETT, P.J., The wear and corrosion resistance of hard PVD coatings. Surface and Coatings Technology, 33 (1987) 191-211

RICKERBY, D.S. & MATTHEWS, A. (Eds), Advanced surface coatings: A handbook of surface engineering, Glasgow, UK, Blackie, 1991 364p.

ROBERTS, E.W. & PRICE, W. B., In-vacuo, tribological properties of "high-rate" sputtered MoS_2 applied to metal and ceramic substrates. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 140 (1989) A65-A70

RONKAINEN, H., HOLMBERG, K., FANCEY, K., MATTHEWS, A., MATTHES, B. & BROSZEIT, E., Comparative tribological and adhesion studies of some titanium-based ceramic coatings. Surface and Coatings Technology, 43/44 (1990) 888-897

ROOS, J.R., CELIS, J.P., VANCOILLE, E., VELTROP, H., BOELENS, S., JUNGBLUT, F., EBBERINK, J. & HOMBERG, H., Interrelationship between processing, coating properties and functional properties of steered arc physically vapour deposited (TiAl)N coatings. Thin Solid Films 193/194 (1990) 547-556

SHERBINEY, M.A. & HALLING, J., Friction and wear of ion-plated soft metallic films. Wear, 45 (1977) 211-220

SHIMAZAKI, Y. & WINER, W.O., Frictional behaviour of sputtered TiN, Wear, 117 (1987) 161-177

SINGER, I.L., FAYEULLE, S. & EHNI, P.D., Friction and wear behaviour of TiN in air: the chemistry of transfer films and derbies formation. Wear, 149 (1991) 375-394

STOTT, F.H., MITCHELL, D.R.G. & WOOD, G.C., The influence of temperature on the friction and wear of thin ceramic coatings in carbon dioxide. J. Phys. D: Appl. Phys., 25 (1992) A189-A194

SUDARSHAN, T.S., Wear resistant coatings. TechTrends, International Reports on Advanced Technologies, Innovation 128, S.A.Paris, 1992, 195p.

SUE, J.A. & TROUE, H.H., Friction and wear properties of titanium nitride coating in sliding contact with AISI 01 steel. Surface and Coatings Technology, 49 (1991) 31-39

SUH, N.P., The delamination theory of wear. Wear, 25 (1973) 111-124

SUH, N.P. & SIN, H.C., The genesis of friction. Wear, 69 (1981) 91-114

SUH, N.P., Tribophysics. Prentice-Hall, Engglewwod Cliffs, New Jersey, USA, 1986. 489 p.

SURI, A.K., NIMMAGADDA, R. & BUNSHAH, R.F., Influence of ion implantation and overlay coatings on various physico-mechanical and wear properties of stainless steel, titanium and aluminium. Thin Solid Films, 64 (1979) 191-203

THORNTON, J.A., Influence of apparatus geometry and deposition conditions on structure and topography of thick sputtered coatings. J. Vac. Sci. Techonol., 11 (1974) 666

VALLI, J., MÄKELÄ, U. & MATTHEWS, A., Assessment of coating adhesion. Surface Engineering, 2 (1986) 1, 49-53

VILNAT, Michel, L'usine Nouvelle - n°2439 - 13.1.1994 p.47-48

VANCOILLE, E., CELIS, J.P. & ROOS, J.R., Tribological and structural characterisation of a physical vapour deposited TiC/Ti(C,N)/TiN multilayer. Tribology Int., 26 (1993) 2, 115-119

VINGSBO, O., HOGMARK, S., JONSSON, B. & INGEMARSSON, A., In: Microindentation Techniques in Material Science and Engineering, Blau, P.J. & Lawn, B.R. (eds) ASTM STP889, Philadelphia, USA, 1986, 257-271

WATANABE, S., MIYAKE, S. & MURAKAWA, M., Tribological properties of cubic, amorphous and hexagonal boron nitride films. Surface and Coatings Technology, 49 (1991) 406-410

WANG et al., Technishe Akademie Esselinger, 10th International Colloquium, 9.1.1996

YAMADA, Y., TANAKA, K. & SAITO, K., Friction and damage of coatings formed by sputtering polytetrafluoroethylene and polyimide. Surface and Coatings Technology, 43744 (1990) 618-628

ANEXO

A

NORMA ISO 7148/1

Norme internationale ISO 7148/1

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION•МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ•ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION

Paliers lisses — Essai du comportement tribologique des matériaux antifriction — Partie 1 : Essai du comportement au frottement et à l'usure des ensembles matériau antifriction/matériau conjugué/huile dans les conditions de lubrification limite

Plain bearings — Testing of the tribological behaviour of bearing materials — Part 1 : Testing of the friction and wear behaviour of bearing material/mating material/oil combinations under conditions of boundary lubrication

Première édition — 1985-03-15

CDU 621.822.5 : 539.62

Réf. n° : ISO 7148/1-1985 (F)

Descripteurs : palier, palier lisse, matériau, essai, essai de frottement.

Prix basé sur 6 pages

ISO 7148/1-1985 (F)

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO, participent également aux travaux.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour approbation, avant leur acceptation comme Normes internationales par le Conseil de l'ISO. Les Normes internationales sont approuvées conformément aux procédures de l'ISO qui requièrent l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 7148/1 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 123, *Paliers lisses*.

© Organisation internationale de normalisation, 1985 •

Imprimé en Suisse

NORME INTERNATIONALE ISO 7148/1-1985 (F)

Paliers lisses — Essai du comportement tribologique des matériaux antifriction — Partie 1: Essai du comportement au frottement et à l'usure des ensembles matériau antifriction/matériau conjugué/huile dans les conditions de lubrification limite

0 Introduction

La présente Norme internationale permet de déterminer le comportement tribologique des matériaux antifriction utilisés dans les paliers lubrifiés à l'huile (voir note au chapitre 4).

Les surfaces du tourillon et du coussinet d'un palier, lubrifié par huile, conçu pour travailler dans des conditions de lubrification hydrodynamique, ne sont pas toujours suffisamment écartées par l'épaisseur du film d'huile qui les sépare. Le pourcentage de durée de vie du palier, durant lequel ce phénomène se produit, varie considérablement d'une application à l'autre. Si l'on ne prévoit pas par ailleurs de lubrification par film épais, c'est la lubrification en régime mixte ou la lubrification limite qui prévalent et l'on ne peut, dans ce cas, éviter l'usure des matériaux du palier et de la surface conjuguée.

1 Objet et domaine d'application

La présente partie de l'ISO 7148 spécifie une méthode d'essai permettant de mesurer le frottement et l'usure des matériaux dans les paliers lubrifiés par huile avec alimentation suffisante en lubrifiant au couple de frottement.

Cette méthode d'essai permet de comparer le comportement au frottement et à l'usure des paliers dans différents cas de combinaisons de matériaux antifriction, de surfaces conjuguées et d'huiles, et ainsi de faciliter le choix du matériau antifriction dont on connaît les conditions de fonctionnement pour un palier fonctionnant à plusieurs reprises ou pendant de longues périodes dans les conditions de lubrification limite, à faible vitesse et en rotation continue. Les conditions d'essai pouvant ne pas être similaires, les mesures obtenues pourront varier d'un essai à l'autre.

2 Références

ISO 468, *Rugosité de surface — Paramètres, leurs valeurs et règles générales de la détermination des spécifications.*

ISO 4386, *Paliers lisses — Essais de compression des matériaux antifriction.*

3 Liste des symboles

b	indice indiquant la condition de lubrification limite
f	coefficient de frottement
F_n	force normale, en newtons
F_f	force de frottement, en newtons
k	coefficient d'usure, en millimètres cubes par newton mètre
s	distance de glissement, en mètres
t_{huile}	température du bain d'huile, en degrés Celsius
u	vitesse de glissement, en mètres par seconde
w_l	quantité de matériau enlevée par usure, mesurée à partir d'une variation de longueur en micromètres
w_v	quantité de matériau enlevée par usure, mesurée à partir d'une variation de volume en millimètres cubes
$w_{l/s}$	taux d'usure linéaire, en micromètres par kilomètre
$w_{v/s}$	taux d'usure volumétrique, en millimètres cubes par mètre
ϱ	rapport de recouvrement (surface de contact divisée par la surface du chemin d'usure)

4 Définitions

NOTE — Dans la présente partie de l'ISO 7148, le terme «huile» est utilisé au sens le plus large pour désigner les huiles minérales et synthétiques.

4.1 lubrification limite: Type de lubrification dans lequel le frottement et l'usure entre deux surfaces en mouvement relatif sont déterminés par les propriétés des surfaces et par les propriétés du lubrifiant autre que la viscosité.

4.2 coefficient de frottement : Quotient de la force de frottement qui s'oppose au mouvement entre deux corps par la force normale qui les appuie l'un sur l'autre, c'est-à-dire :

$$f = \frac{F_f}{F_n}$$

4.3 taux d'usure : Quantité de matière enlevée par unité de longueur de glissement sous l'effet de l'usure, c'est-à-dire :

$$w_{v/s} = \frac{w_v}{s} \quad \text{ou} \quad w_{l/s} = \frac{w_l}{s}$$

4.4 coefficient d'usure : Taux d'usure volumétrique rapporté à la force normale appliquée, c'est-à-dire :

$$k = \frac{w_{v/s}}{F_n}$$

5 Appareillage

Les figures 1 et 2 représentent de façon schématique deux types possibles de montage des éprouvettes. Une éprouvette fixe (le pion) faite dans le matériau antifriction à essayer est pressée avec une force normale connue contre une éprouvette qui tourne (l'anneau) faite dans le matériau conjugué (en général en acier à bas carbone). La surface de contact entre le pion A et l'anneau B doit de préférence être complètement immergée dans l'huile. On peut utiliser la lubrification par pulvérisation si le volume lubrifiant déposé est suffisant pour garantir que le taux d'usure ne dépendra pas du débit de lubrifiant. L'huile ne doit pas être réinjectée dans le circuit ni réutilisée.

Les surfaces fréquemment soumises aux essais sont en général des surfaces à courbures cylindriques (paliers radiaux). Si les matériaux sont multicouches, on peut procéder de deux manières différentes :

a) adapter le rayon de l'anneau à celui du pion (voir figure 1);

b) commencer l'essai en situation de contact linéaire (rayon du pion supérieur au rayon de l'anneau).

Si l'essai porte sur des matériaux multicouches à surfaces planes (paliers de butée) le montage pion sur anneau (voir figure 1) ne convient que dans la mesure où l'on accepte un contact linéaire initial. Sinon il faut adopter le montage pion sur surface plane (voir figure 2).

La température de l'huile, t_{huile}, doit être maintenue constante c'est-à-dire à la valeur d'essai désirée ± 0,5 K. Si les essais doivent avoir lieu sous gaz de protection, la chambre de frottement utilisée devra être suffisamment étanche. Des moyens doivent être disponibles pour mesurer le frottement et l'usure en continu. Un faible niveau de vibration est indispensable pour obtenir des résultats reproductibles.

6 Préparation des surfaces d'essai

Après avoir donné aux surfaces d'essai une finition convenable (voir chapitre 8), il faut nettoyer complètement les éprouvettes de tout contaminant en utilisant par exemple un appareil de dégraissage ou à vapeur.

7 Mode opératoire

Appliquer une force normale, F_n, (voir chapitre 8) avec une vitesse de glissement, u, de 0,01 ± 0,001 m/s. À cette valeur de u, on est censé être en régime de lubrification limite.

Établir des courbes du frottement et de l'usure, en fonction de la distance de glissement, de manière à pouvoir distinguer entre les régimes de rodage et de fonctionnement normal stabilisé. Donner la distance totale de glissement avec les résultats. Mesurer, une fois l'essai terminé, l'usure de la surface de l'anneau, par exploration du profil par exemple à l'aide d'un palpeur, de manière à faire la part de l'usure de l'anneau dans l'évaluation de l'usure totale. Ce palpage permet également de voir si la surface de l'anneau a été égratignée par le pion.

Déterminer l'usure du pion par pesage avant et après l'essai. L'usure du pion ne devrait pas être inférieure à 5 mg.

Contrôler, une fois l'essai terminé, l'état de surface du pion et de l'anneau (formation d'une couche de réaction, transfert de matière, rainures, etc.).

Remplacer les matériaux utilisés pour les éprouvettes ainsi que l'huile après chaque essai.

8 Variables d'essai indépendantes

Pour effectuer les essais comparatifs des différentes combinaisons de matériaux et d'huile, il faut choisir les procédés d'usinage et de finition des éprouvettes (pion en matériau antifriction et anneau en matériau conjugué) ainsi que les valeurs d'un certain nombre de variables d'essai indépendantes qui doivent demeurer constantes pendant tout l'essai. Ces variables sont les suivantes :

a) la rugosité initiale, R_a et R_z, du pion et de l'anneau (voir ISO 468);

b) la force normale, F_n;

c) la température de l'huile, t_{huile};

d) la distance de glissement, s;

e) le rapport de recouvrement, ϱ.

NOTE — Pour simuler frottement et usure dans un palier donné, il convient de choisir des valeurs réalistes de la rugosité, R_a et R_z, de la force normale, F_n, de la température de l'huile, t_{huile}, ainsi qu'une distance de glissement, s, suffisamment longue.

En pratique la surface du tourillon a une rugosité de surface dite « d'atelier » c'est-à-dire qui dépend des possibilités techniques de l'atelier, du type d'usinage employé, ainsi que du soin et de l'habileté professionnelle de l'opérateur chargé de faire le tourillon. Pour évaluer l'aptitude à l'emploi d'un matériau dans un cas d'application particulier, il est donc important que la surface soit représentative de la surface obtenue dans le cas considéré.

En cas de fonctionnement prolongé en régime de lubrification limite on peut (mais ce n'est pas obligatoire) observer une diminution graduelle de la rugosité de l'anneau en acier sous l'effet du contact avec le matériau du palier [1]. Ceci peut à son tour avoir pour conséquence une diminution appréciable du taux d'usure du matériau du palier. Lors du choix des matériaux pour les applications dans lesquelles le palier est conçu pour travailler à un régime de lubrification limite pendant un intervalle de temps appréciable, il convient de tenir compte de ce phénomène, et de réaliser à cet effet des essais à long terme en mesurant le volume d'usure en fonction de la distance de glissement. La rugosité de surface de l'anneau, R_a et R_z, doit également être mesurée en fin d'essai et donnée avec les résultats.

Pour ce qui est de F_n, le compromis le plus couramment admis est d'avoir une égalité entre la force maximale par unité de surface projetée du pion et la force par unité de surface projetée du palier. Il peut s'avérer souhaitable de procéder par étapes pour l'application de la charge.

Pour t_{huile}, on devrait choisir une température correspondant à la température la plus haute susceptible d'être notée.

Si l'on veut comparer les comportements au frottement et à l'usure d'une combinaison donnée matériau antifriction/matériau conjugué/huile avec d'autres combinaisons sans avoir en tête une application particulière, il est préférable de laisser de larges marges de variation aux valeurs de R_a et R_z, de la force normale, F_n, et de la température de l'huile, t_{huile}.

9 Description des matériaux, de l'huile, des conditions d'essai et des résultats

Sauf indication contraire, on doit fournir pour décrire les matériaux, l'huile, les conditions d'essai et les résultats d'essai, les indications suivantes :

9.1 Matériaux

9.1.1 Matériau antifriction

Type

Composition chimique (*m/m*)

Méthode d'élaboration

Traitement thermique

Traitement de surface

Structure micrographique

Dureté

Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % $R_{p0,2}$ (voir ISO 4385)

9.1.2 Matériau conjugué

Type

Composition chimique (*m/m*)

Traitement thermique

Traitement de surface

Structure micrographique

Dureté

9.1.3 Lubrifiant

Type (y compris les informations sur sa viscosité et si possible ses additifs).

NOTE — Dans certains cas, il peut s'avérer préférable d'utiliser l'huile prévue pour l'application réelle pour laquelle sont évalués les matériaux.

9.2 Gaz de protection

Type

Humidité relative, exprimée en pourcentage

9.3 Éprouvettes

9.3.1 Pion

Matériau : matériau antifriction (voir 9.1.1)

Dimensions

Méthode de finition superficielle

R_a et R_z, en micromètres

9.3.2 Anneau

Matériau : matériau conjugué (voir 9.1.2)

Dimensions

Rapport de recouvrement, ϱ

Méthode de finition superficielle

R_a et R_z, en micromètres

9.4 Variables

Force normale, F_n, en newtons

Vitesse de glissement, u, en mètres par seconde

Température du lubrifiant, t_{huile}, en degrés Celsius

Distance de glissement, s, en mètres

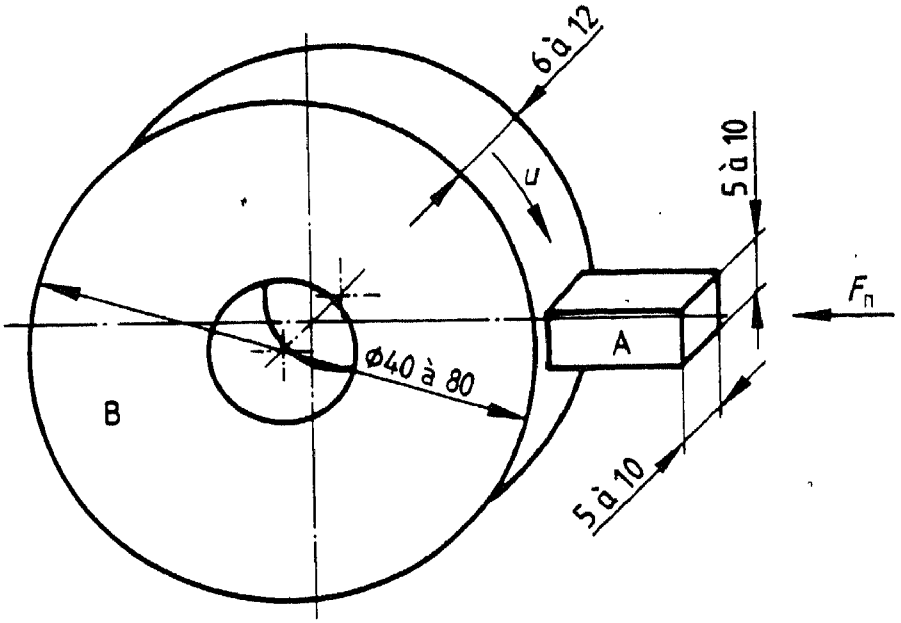
NOTE — La vitesse de glissement, u, est fixée à 0,01 ± 0,001 m/s.

9.5 Résultats d'essai

Désignation			Symbole	Unité
Coefficient de frottement en période de régime normal stabilisé			f_b	
Taux d'usure linéaire du pion en période de régime normal stabilisé			$w_{l/s}$	µm/km
Taux d'usure volumétrique du pion en période de régime normal stabilisé [1]			$w_{v/s}$	mm^3/m
Coefficient d'usure du pion en période de régime normal stabilisé [1]			k_b	$mm^3/(N \cdot m)$
Volume total d'usure du pion			w_{vp}	mm^3
a) calculé d'après la courbe usure-distance de glissement				
b) calculé à partir de la perte de masse				
Volume total d'usure de l'anneau			w_{vd}	mm^3
État de surface	Pion	Anneau		
Rugosité				
R_a				µm
R_z				µm
Transfert de matière	( )	( )		—
Couche de réaction	( )	( )		—
Éraflures				
– néant	( )	( )		—
– quelques (1 à 3)	( )	( )		—
– beaucoup	( )	( )		—

1) Dans le cas des matériaux multicouches, l'épaisseur du revêtement doit être suffisante pour pouvoir obtenir un régime permanent ou l'éprouvette doit être courbée pour épouser la forme de l'anneau.

Dimensions en millimètres



NOTE — La largeur de l'anneau B doit être supérieure à celle du pion A. La surface de contact du pion peut être façonnée au préalable pour s'adapter au rayon de courbure de l'anneau. Bien qu'un large défaut d'ajustement soit admis (différence de rayons, contact linéaire initial), il peut prolonger indûment la période de rodage (voir chapitre 7). Pour les matériaux multicouches, disponibles uniquement sous la forme de coussinets cylindriques, on ne peut souvent pas éviter de commencer l'essai par un contact linéaire (lorsque par exemple le diamètre intérieur du coussinet dépasse 80 mm).

Figure 1 — Représentation schématique du montage pion sur surface courbe

Dimensions en millimètres

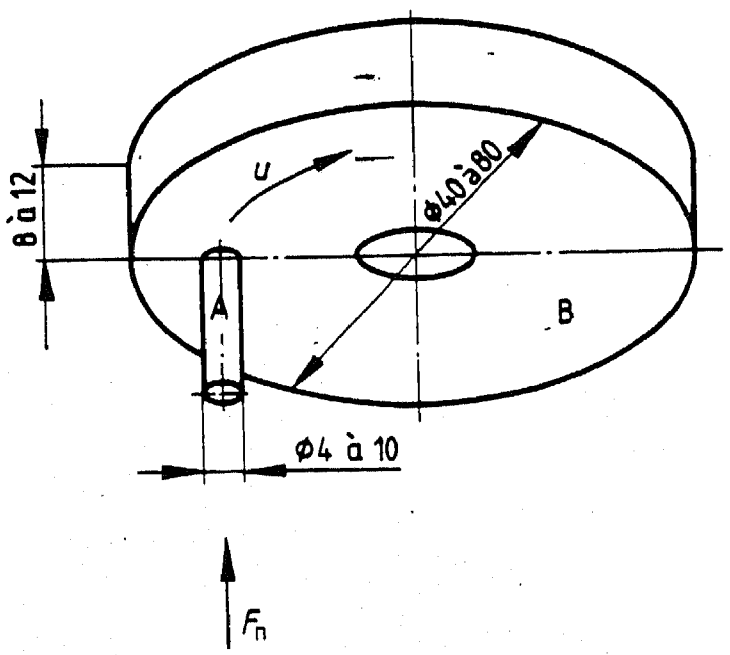


Figure 2 — Représentation schématique du montage pion sur surface plane

Bibliographie

[1] BEGELINGER, A. and DE GEE, A.W.J. *Wear in lubricated journal bearings.* Transactions ASME 100 (1), 1978, 104-109.

[2] HABIG, K.-H., BROSZEIT, E. and DE GEE, A.W.J. *Friction and wear tests on metallic bearing materials for oil lubricated bearings.* Wear 69, 1981, 43-54.

La Norme internationale suivante sera également utile à consulter en relation avec la présente partie de l'ISO 7148:

ISO 4378, *Paliers lisses — Termes, définitions et classification —*

Partie 1: Conception, matériaux pour paliers et leurs propriétés.

Partie 2: Frottement et usure.

Partie 3: Lubrification.

ANEXO

B

PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS

PVD-REVESTIMENTO DUROS NO VACUO,Lda

OPERADOR	FORNADA	DATA	ORDENS N.	PRE-TRATAMENTOS
		16.2.94		

PECAS	C	M	B VACUO MAXIMO
	4 + 1		

INICIO DE BOBINAGEM	ESTANQUIDADE		ALVO 1	Ti	GAS 1	GAS 2
	INICIO		ALVO 2	Ti	N_2	
	FIM		ALVO 3	Ti		
	Torr/G					

	PRESSAO		ALVO 1		ALVO 2		ALVO 3		PECAS		TEMP.
	C	B	V	A	V	A	V	A	V	A	a.C
11.40		4,03	295	0,08	245	1,00	321	1,00	1001	030	= =
11.55		4	243	1,98	281	2,00	312	2,002	1001	054	= =
12.10		4	280	2,90	305	3,00	346	3,02	1031	028	= =
12.25			284	2,90	306	3,00	361	3,02	1001	079	283
12.35	4,03		360	12	363	10,24	482	12a	060	2,52	= =
13.55	4		344	12	385	10,20	512	12	060	2,81	= =
14.50	4		352	12	356	10,30	424	12	060	2,85	= =
15.15	4		352	12	366	10,20	430	12	060	2,34	280
11.55	4		349	12	355	10,	425	12	060	2,84	= =
11.15	4		362	12	326	10	525	12	060	2,36	282
12.05	4		346	12	354	10	466	12	060	2,94	= =
12.20			354	12	362	10	422	12	060	2,31	= =

100% Ti 549	55 %	N2 3,1	ROTACAO	ABERTURA CAMADA

INIC.		COMENTARIOS
FIM		
Torr/h		

20
45
25
20
15

8310

PVD-REVESTIMENTO DUROS NO VACUO,Lda

OPERADOR	FORNADA	DATA	ORDENS N.	PRE-TRATAMENTOS
[illegible]	4	23-9-96	[illegible]	[illegible]

PECAS C [illegible] M [illegible] B VACUO MAXIMO

INICIO DE BOBINAGEM	ESTANQUIDADE		ALVO 1	Ti	GAS 1	GAS 2
	INICIO		ALVO 2	Ti	N2	
	FIM		ALVO 3	Ti		
	Torr/G					

	PRESSAO		ALVO 1		ALVO 2		ALVO 3		PECAS		TEMP.
	C	B	V	A	V	A	V	A	V	A	a.C
10.50	[illegible]		[illegible]								
11.20	[illegible]		[illegible]								
12.50	[illegible]		[illegible]								
12.20	[illegible]		[illegible]								
13.40	[illegible]		[illegible]								
13.50	[illegible]		[illegible]								
14.30	[illegible]		[illegible]								
16.30	[illegible]		[illegible]								
14.00	[illegible]		[illegible]								
9.45	[illegible]		[illegible]								
10.15	[illegible]		[illegible]								
11.45	[illegible]		[illegible]								
12.15	[illegible]		[illegible]								

100% Ti	[illegible]	55 %	N.2 [illegible]	ROTACAO	ABERTURA CAMADA
..					

INIC.		COMENTARIOS
FIM		
Torr/h		

9310

PVD-REVESTIMENTO DUROS NO VACUO,Lda

OPERADOR	FORNADA	DATA	ORDENS N.	PRE-TRATAMENTOS
[illegible]	3	9-10-94	[illegible]	Tt

PECAS C [illegible] M B VACUO MAXIMO

INICIO DE BOBINAGEM	ESTANQUIDADE		ALVO 1	Ti	GAS 1	GAS 2
	INICIO		ALVO 2	Zr	N2	//
	FIM		ALVO 3	Ti		
	Torr/G					

	PRESSAO		ALVO 1		ALVO 2		ALVO 3		PECAS		TEMP.
	C	B	V	A	V	A	V	A	V	A	a.C
9.50	[illegible]		343	16.98	331	10.24	[illegible]	[illegible]	060	3.00	= =
10.00	[illegible]		340	16.98	334	10.23	498	12.00	060	2.98	260
11.55	[illegible]		348	16.98	350	10.25	468	12	060	3.02	= =
12.25	[illegible]		351	16.98	341	10.21	423	12	060	302	294
14.45	[illegible]		348	16.98	336	10.21	428	12	060	302	= =
15.15	[illegible]		355	16.98	346	10.25	469	12	060	302	288
16.20	[illegible]		342	16.98	352	10.25	462	12	060	308	= =
16.50			348	16.98	361	10.21	462	12	060	304	293

100% Ti	6 1 C	55 %	N.2 3 5	ROTACAO	ABERTURA CAMADA
				4	

INIC.		COMENTARIOS
FIM		
Torr/h		

9310

PVD-REVESTIMENTO DUROS NO VACUO,Lda

OPERADOR	FORNADA	DATA	ORDENS N.	PRE-TRATAMENTOS

PECAS	C	M	B VACUO MAXIMO

INICIO DE BOBINAGEM	ESTANQUIDADE	ALVO 1	Ti	GAS 1.	GAS 2
	INICIO	ALVO 2	Zr		
	FIM	ALVO 3	Ti		
	Torr/G				

	PRESSAO		ALVO 1		ALVO 2		ALVO 3		PECAS		TEMP.
	C	B	V	A	V	A	V	A	V	A	o.C
11.50											
11.55											
12.15											
13.50											
14.10											
15.30											
16.10											
16.35											
16.20											
9.00											
9.45											

100% Ti	%	N.2	ROTACAO	ABERTURA CAMADA
			4	

INIC.	COMENTARIOS
FIM	
Torr/h	

9310

PVD-REVESTIMENTO DUROS NO VACUO,Lda

OPERADOR	FORNADA	DATA	ORDENS N.	PRE-TRATAMENTOS

PECAS	C	M	B VACUO MAXIMO

INICIO DE BOBINAGEM	ESTANQUICIDADE		ALVO 1	Ti	GAS 1	GAS 2
	INICIO		ALVO 2	Zr	N2	
	FIM		ALVO 3	Ti		
	Torr/G					

	PRESSAO		ALVO 1		ALVO 2		ALVO 3		PECAS		TEMP.
	C	B	V	A	V	A	V	A	V	A	a.C
9.35	4.0-3		242	003	259	100	192	100	100	050	= =
9 55	4		263	198	266	200	254	202	100	054	= =
10.20	4		261	198	265	200	252	202	100	049	= =
10 40	4		262	198	265	200	252	202	100	050	293
13.25	4		332	1222	349	10.24	442	11	060	284	= =
14.25	4		340	1222	356	10.24	450	12	060	280	294
15.45	4		334	14.22	348	10.24	441	12	060	273	= =
16.15			334	14.22	352	10.24	444	12	060	284	298
16.50			333	14.22	342	10.24	441	12	060	304	= =
17.20			332	14.22	342	10.24	442	12	060	300	299

100% Ti	12.65	%	N.2	ROTACAO	ABERTURA CAMADA

INIC.		COMENTARIOS
FIM		
Torr/h		

9310

PVD-REVESTIMENTO DUROS NO VACUO,Lda

OPERADOR	FORNADA	DATA	ORDENS N.	PRE-TRATAMENTOS
2120-U	J	2-10-96	~ x x	

PECAS	C	M	B VACUO MAXIMO
	1 1 1		

INICIO DE BOBINAGEM	ESTANQUIDADE		ALVO 1	Ti	GAS 1	GAS 2
	INICIO		ALVO 2	Zr	1/1	
	FIM		ALVO 3	Ti		
	Torr/G					

	PRESSAO		ALVO 1		ALVO 2		ALVO 3		PECAS		TEMP.
	C	B	V	A	V	A	V	A	V	A	o.C
10.10	4.0-3		283	0.22	241	0.24	292	0.26	1001	0.14	= =
11.10	4.0-3		297	0.48	226	0.50	296	0.52	1001	0.20	= =
11.40	4.0-3		301	0.98	2400	1.00	325	1.02	1001	0.34	= =
12.10	4.0-3		302	1.98	251	2.00	345	2.02	1001	0.64	= =
12.25	4.0-3		280	1.98	235	2.00	315	2.02	1001	0.22	= =
13.40	4.0-3		314	1.98	308	2.00	304	2.02	1001	0.52	= =
15.10	4		262	2.98	385	3.00	320	3.02	1001	0.28	= =
14.25	4		220	2.98	231	3.00	324	3.02	1001	0.28	= =
15.00	—		245	2.98	290	3.00	325	3.02	1001	0.28	= =
15.40	~		264	2.98	285	3.00	316	3.02	1001	0.24	2x3

100% Ti	%	N.2	ROTACAO	ABERTURA CAMADA

INIC.		COMENTARIOS
FIM		
Torr/h		

PVD-REVESTIMENTO DUROS NO VACUO, Lda

OPERADOR	FORNADA	DATA	ORDENS N.	PRE-TRATAMENTOS
Luis	1	28-10-92	XXX	

PECAS	C	M	B	VACUO MAXIMO
	h - + 18			

INICIO DE BOBINAGEM	ESTANQUIDADE		ALVO 1	Zr	GAS 1	GAS 2
	INICIO		ALVO 2	Zr	N2	/
	FIM		ALVO 3	Zr		
	Torr/G					

	PRESSAO		ALVO 1		ALVO 2		ALVO 3		PECAS		TEMP.
	C	B	V	A	V	A	V	A	V	A	a.C
11.10	4e-3		405	16	355	10	490	16	060	2.26	= =
30 11.40	4		419	16	371	10	519	16	060	2.26	2 24
13.50	4		408	16	358	10	505	16	060	2.26	= =
30 14.20			416	16	359	10	516	16	060	2,68	2.84

100% TI	%	N.2	ROTACAO	ABERTURA CAMADA

INIC.	COMENTARIOS
FIM	
Torr/h	

9310

PVD-REVESTIMENTO DUROS NO VACUO,Lda

OPERADOR	FORNADA	DATA	ORDENS N.	PRE-TRATAMENTOS
1490-0	1	29-10-96	XXX	~~Limpeza~~

PECAS	C	M	B VACUO MAXIMO
	4 + 18		

INICIO DE BOBINAGEM	ESTANQUIDADE		ALVO 1		GAS 1	GAS 2
	INICIO		ALVO 2	Zr	N2	/ ..
	FIM		ALVO 3	Zr		
	Torr/G					

	PRESSAO		ALVO 1		ALVO 2		ALVO 3		PECAS		TEMP.
	C	B	V	A	V	A	V	A	V	A	o.C
11,40	4,05		324	022	314	024	350	026	1001	022	= =
12,10	4		336	048	221	0,50	353	052	1001	024	= =
12,25	4		324	048	220	050	334	052	1001	024	= =
13,30	4		342	048	289	050	358	052	1001	024	= =
14,00	4		2,11	098	264	100	324	102	1001	030	= =
14,20	4		309	1,98	284	200	353	3,02	1001	052	= =
15,15	4		314	298	312	300	322	302	1001	026	= =
15,30	4		315	2,98	312	300	322	302	1001	024	293
16,40	4		310	2,88	300	300	356	302	1001	026	= =
17,00	4		412	16	364	10	570	16	0,06	8,20	= =
17,20	4		430	16	385	10	536	16	066	220	294

100% TI 3,35	55%	N.2 3,9	ROTACAO	ABERTURA CAMADA

INIC.		COMENTARIOS
FIM		
Torr/h		

20

PVD-REVESTIMENTO DUROS NO VACUO,Lda

OPERADOR	FORNADA	DATA	ORDENS N.	PRE-TRATAMENTOS
JLDO-O	1	4-10-96	VXA	[redacted]

PECAS	C	M	B	VACUO MAXIMO
	1.2			

INICIO DE BOBINAGEM	ESTANQUIDADE		ALVO 1	21'	GAS 1	GAS 2
15'	INICIO		ALVO 2	2'	N2	1.1
	FIM		ALVO 3	2i		
	Torr/G					

	PRESSAO		ALVO 1		ALVO 2		ALVO 3		PECAS		TEMP.
	C	B	V	A	V	A	V	A	V	A	oC
12.55	4.0-3		408	X.98	356	10.24	495	17.00	060	2,30	==
16.45			479	16.93	3.98	10.24	521	12	050	2.30	283

100% TI	21C	55 %	N.2 3,9	ROTACAO	ABERTURA CAMADA

INIC.		COMENTARIOS
FIM		
Torr/h		

9310

PVD-REVESTIMENTO DUROS NO VACUO,Lda

OPERADOR	FORNADA	DATA	ORDENS N.	PRE-TRATAMENTOS
Ilda-U	5	4-10-96	x x x	[illegible]

PECAS	C	M	B VACUO MAXIMO
	4+1		

INICIO DE BOBINAGEM	ESTANQUIDADE		ALVO 1		GAS 1	GAS 2
15 4.	INICIO		ALVO 2	ZV	N2	/
	FIM		ALVO 3	ZV		
	Torr/G					

	PRESSAO		ALVO 1		ALVO 2		ALVO 3		PECAS		TEMP.
	C	B	V	A	V	A	V	A	V	A	o.C
10.55	4-03		294	022	228	024	287	026	1001	026	= =
11.25	4.03		297	0 49	225	050	306	0 50	1001	022	= =
11 55	U		306	098	256	160	342	102	1001	034	= =
13.30	—		300	093	262	1 00	302	102	1001	028	= =
16.5,	U		292	1,98	273	2 00	323	202	1001	050	= =
15.20	—		304	2.98	196	300	354	302	1001	022	= =
15 35	—		304	2.98	299	300	352	302	1001	022	282
16.50	U		410	16,98	360	10,24	5 06	12	060	2.28	= =
20 17.10	V		434	16,98	386	10,24	543	12	060	2.32	280
10 25	V		407	16,98	352	10,24	491	12	060	2.81	= =
35 11.00			421	16,98	321	10,24	523	12	060	2.32	224

100% TI	2 16	52 %	N.2 3.9	ROTACAO	ABERTURA CAMADA
"				4	

INIC.		COMENTARIOS
FIM		
Torr/h		

9310

ANEXO

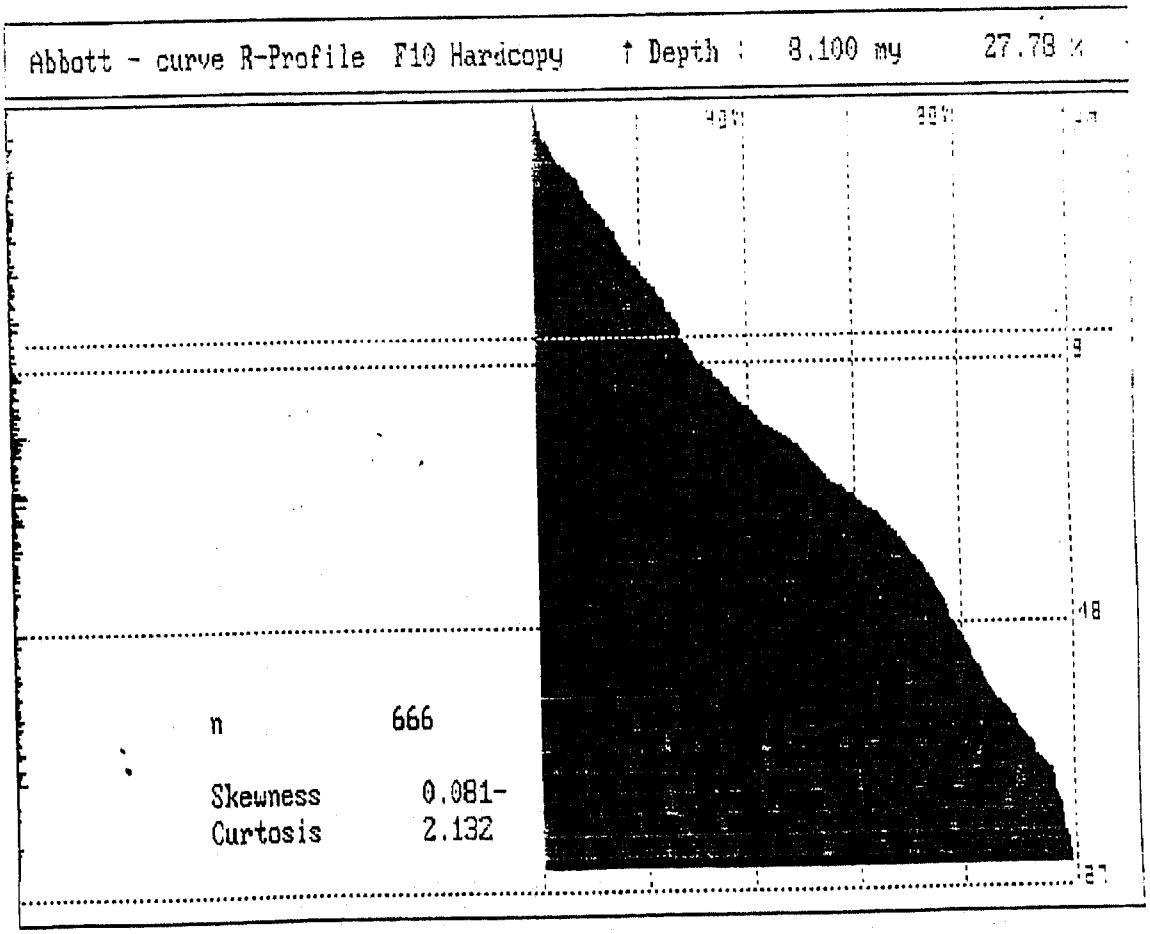
C

MEDIÇÃO DE RUGOSIDADES

Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Patim C220
Morada	: Revestimentos	Designacao	: E14
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 4 Outubro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 4.80 mm	cut - off	: 0.800 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

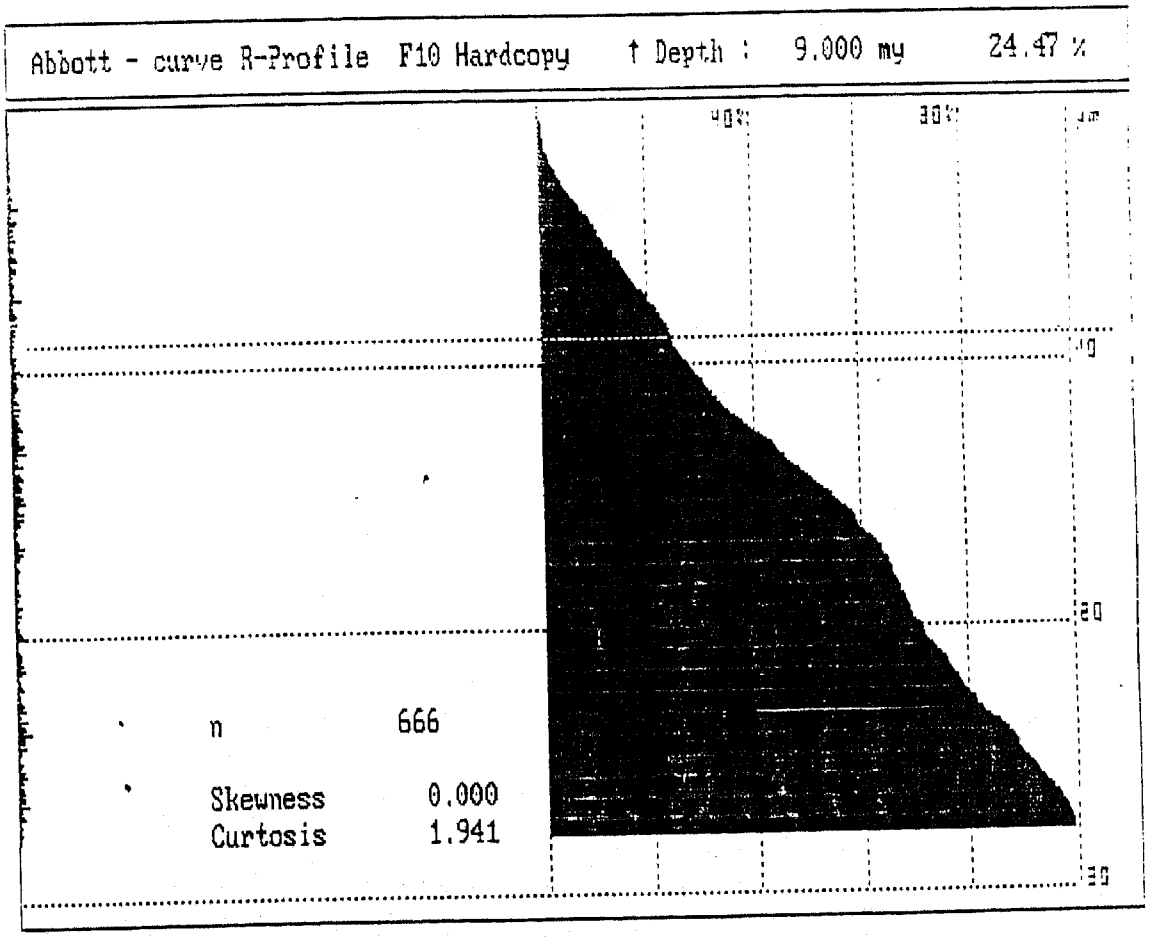
Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
10	26.350	26.350	23.830	5.250	13.60	3.210	17.720	2.640
	Mr2							
	91.80							



Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Patim C220
Morada	: Revestimentos	Designacao	: E14
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 4 Outubro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 4.30 mm	cut - off	: 0.800 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

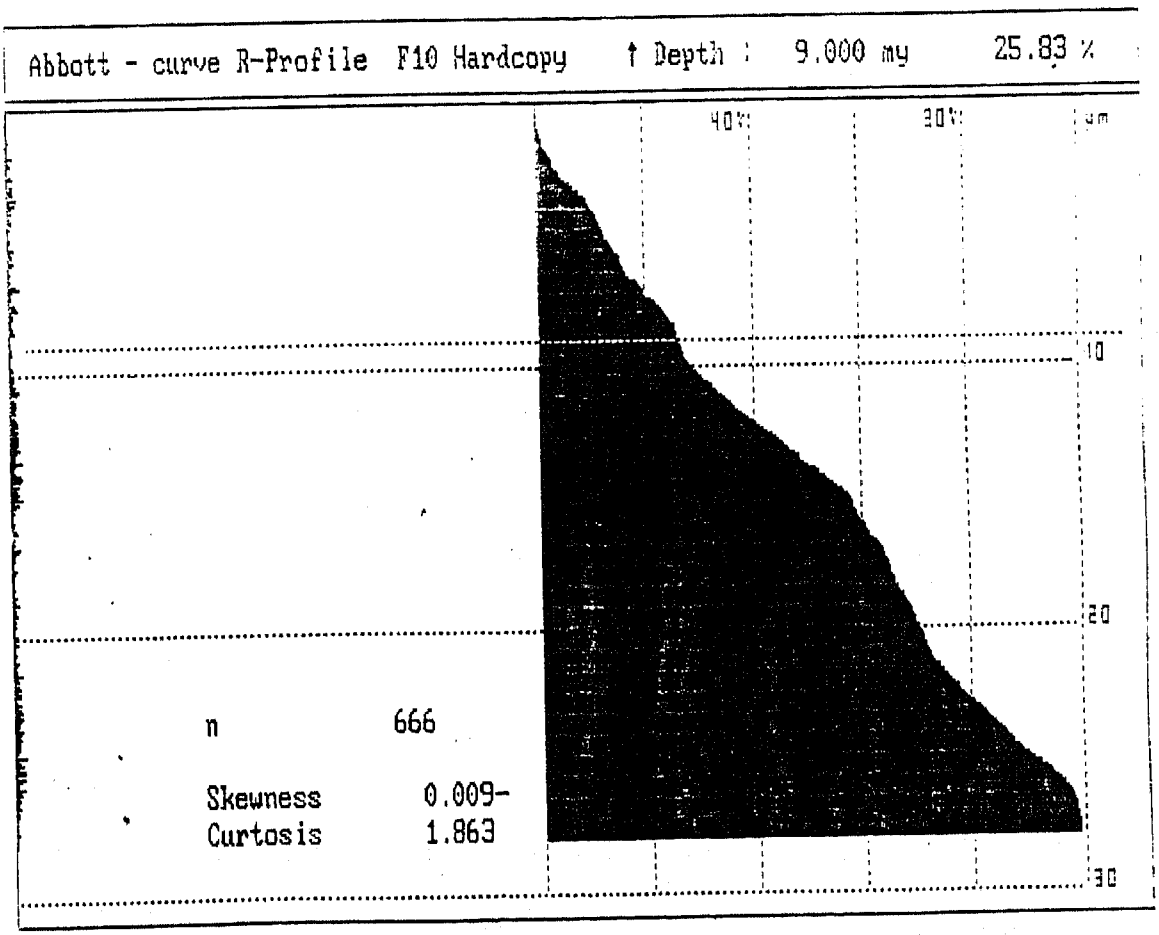
Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
11	27.710	27.710	25.330	6.000	4.20	1.960	20.900	3.040
	Mr2							
	88.50							



Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Patim Ø220
Morada	: Revestimentos	Designacao	: E14
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 4 Outubro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 4.80 mm	cut - off	: 0.800 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
12	27.920	27.240	25.000	6.230	4.20	2.240	21.150	2.950
	Mr2							
	88.40							

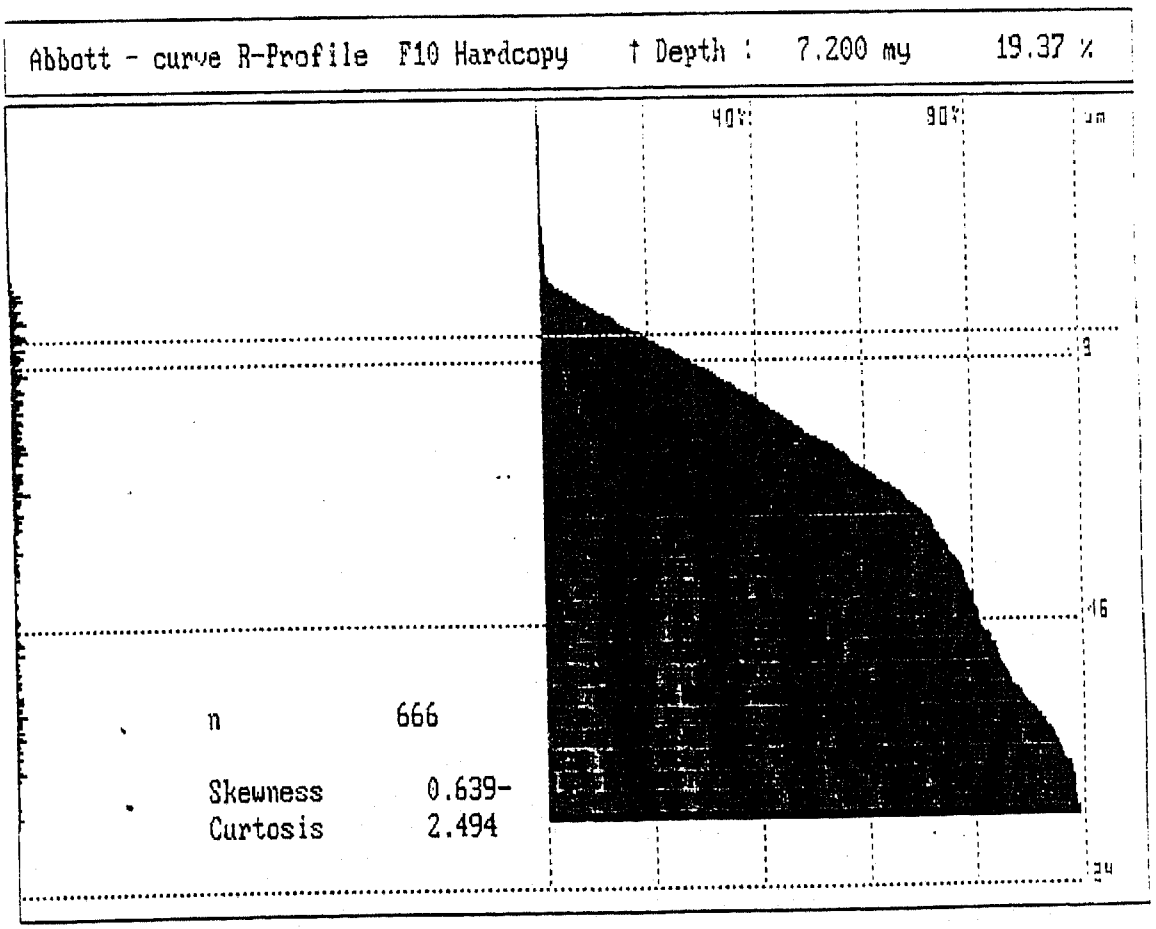


Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Patim ZrN
Morada	: Revestimentos	Designacao	: E26
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 8 Novembro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 4.80 mm	cut - off	: 0.800 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
1	22.080	21.250	17.130	3.520	2.00	3.160	9.220	7.080

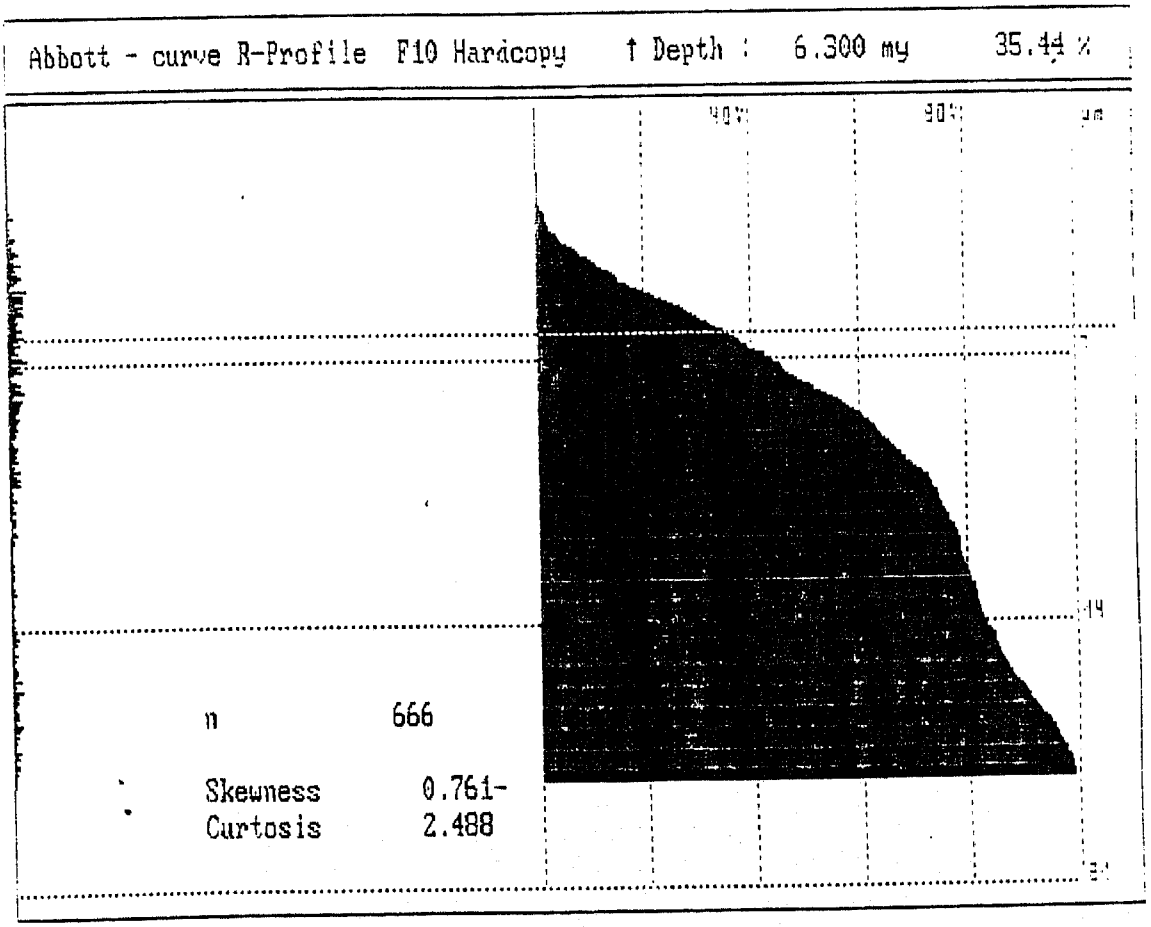
Mr2
77.60



Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Patim ZrN
Morada	: Revestimentos	Designacao	: E26
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 8 Novembro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 4.80 mm	cut - off	: 0.800 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

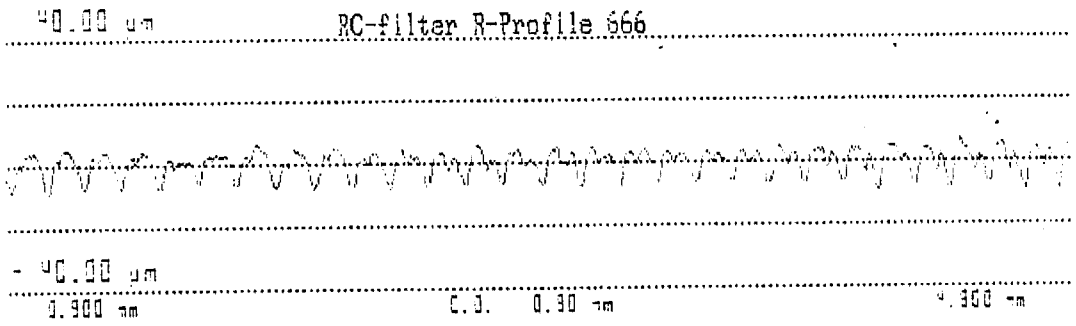
Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
2	18.460	18.460	15.620	3.310	2.00	1.220	8.250	7.270
	Mr2							
	77.40							

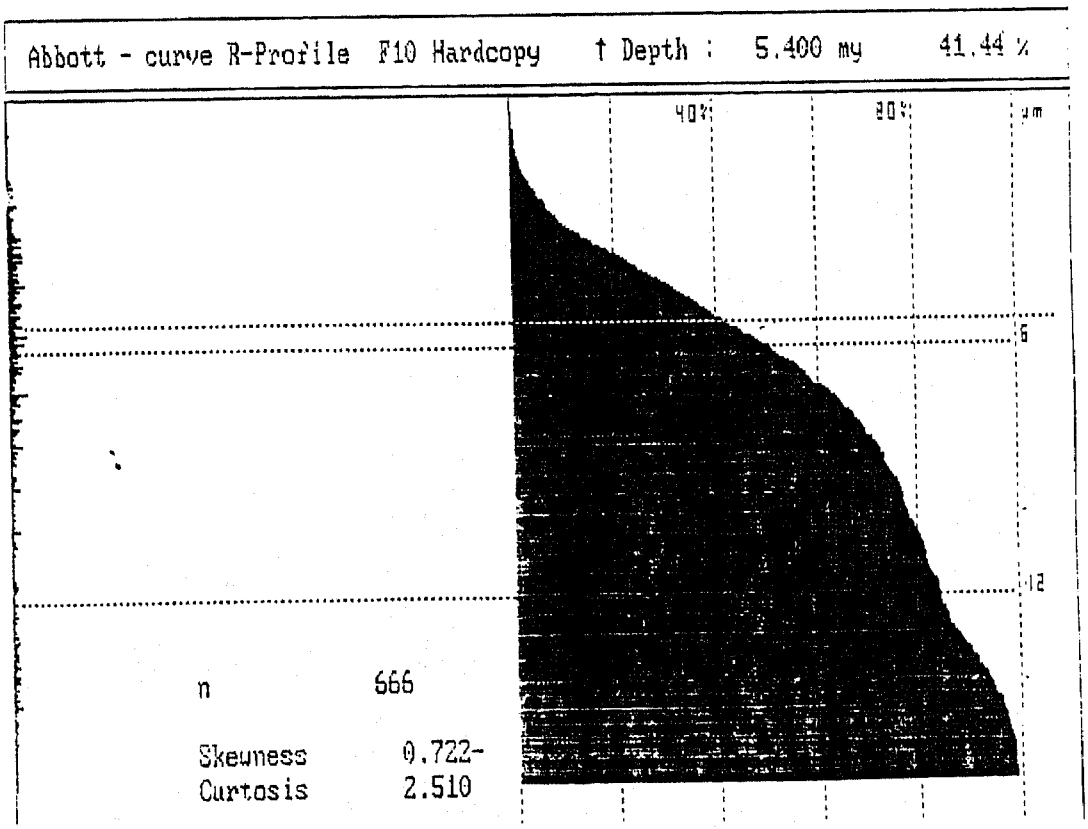


Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Patim ZrN
Morada	: Revestimentos	Designacao	: E26
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 8 Novembro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 4.80 mm	cut - off	: 0.800 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
3	16.760	16.760	14.550	3.010	2.50	1.100	7.700	6.370
	Mr2							
	77.70							

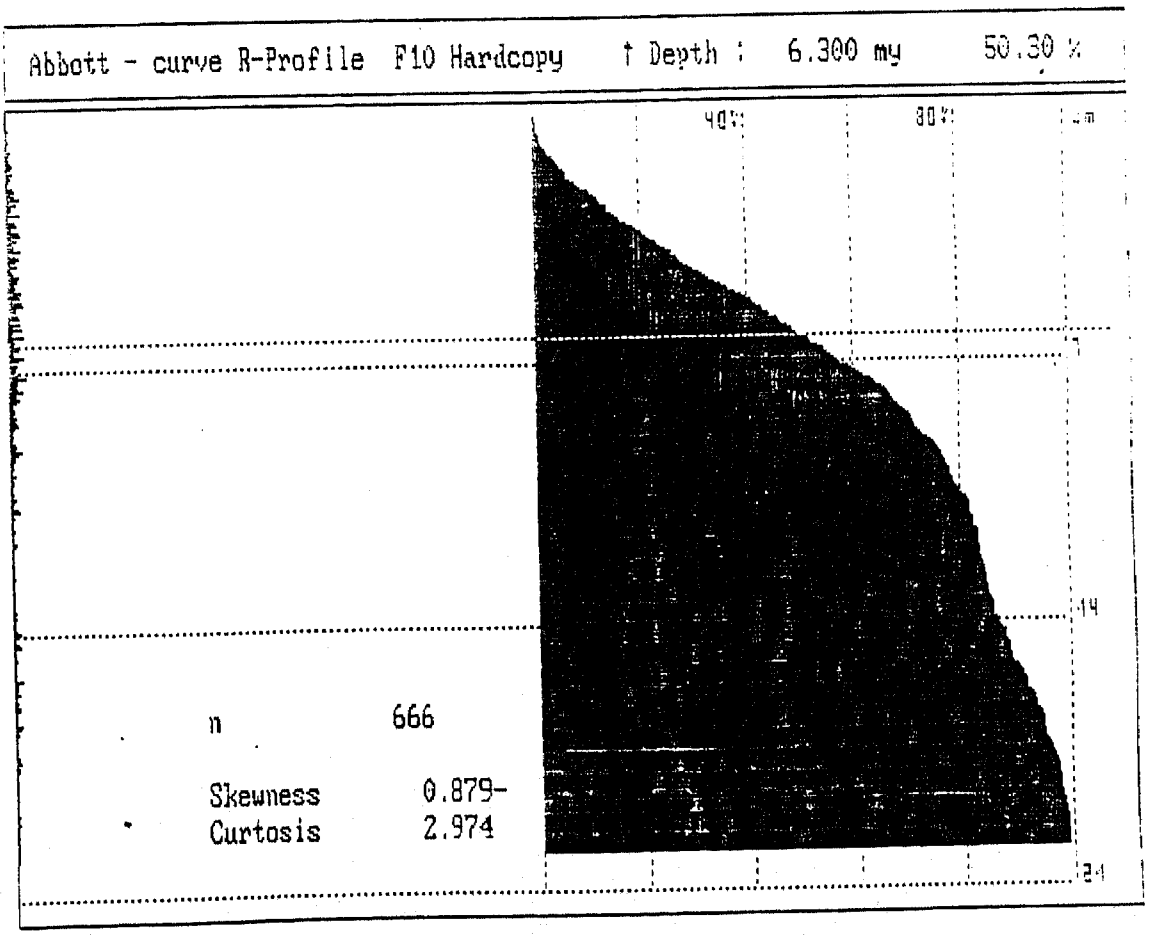




Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Patim TiN
Morada	: Revestimentos	Designacao	: E1
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 4 Outubro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 4.80 mm	cut - off	: 0.800 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

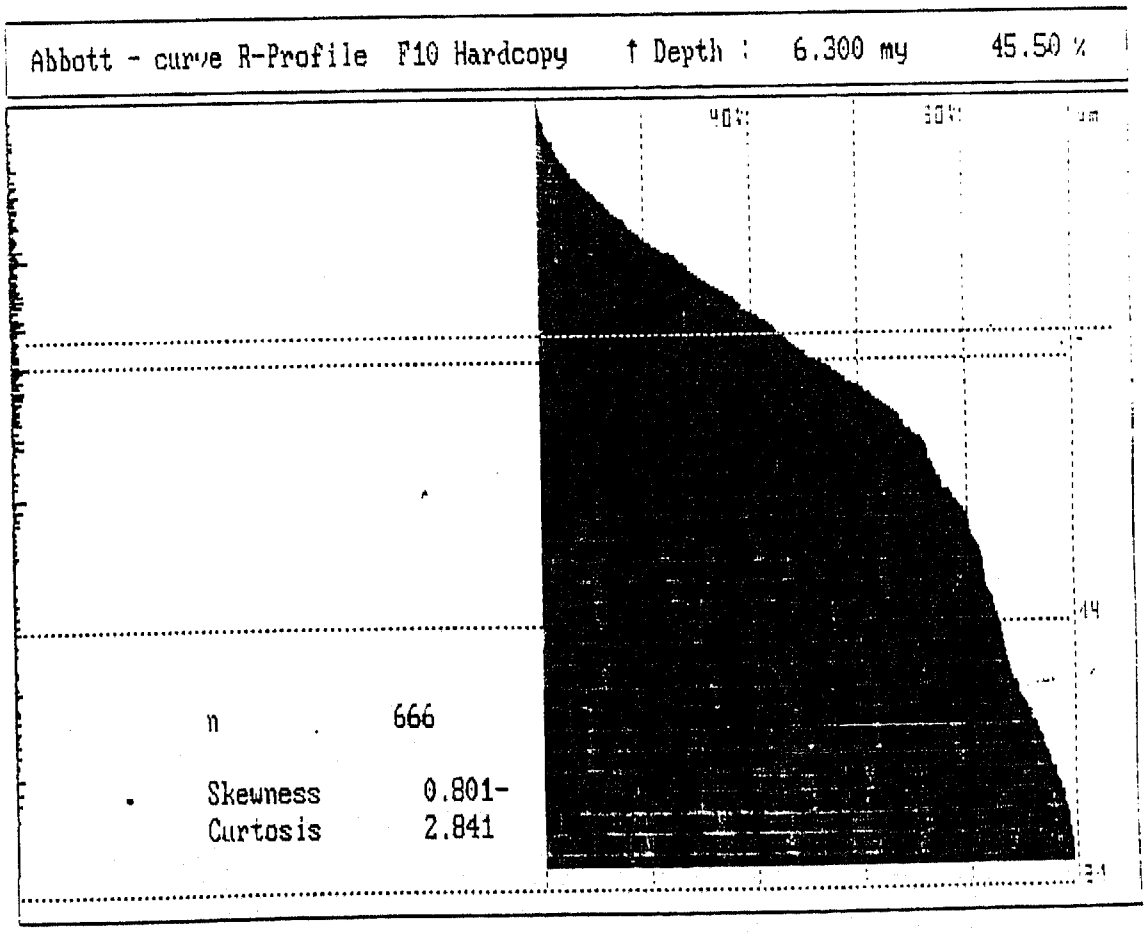
Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
3	19.930	19.930	17.400	3.520	0.90	0.240	11.050	7.360
	Mr2							
	82.20							



Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Patim TiN
Morada	: Revestimentos	Designacao	: E1
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 4 Outubro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 4.80 mm	cut - off	: 0.800 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk	Mr2
4	20.450	20.210	17.720	3.710	1.50	0.420	12.200	6.910	83.30

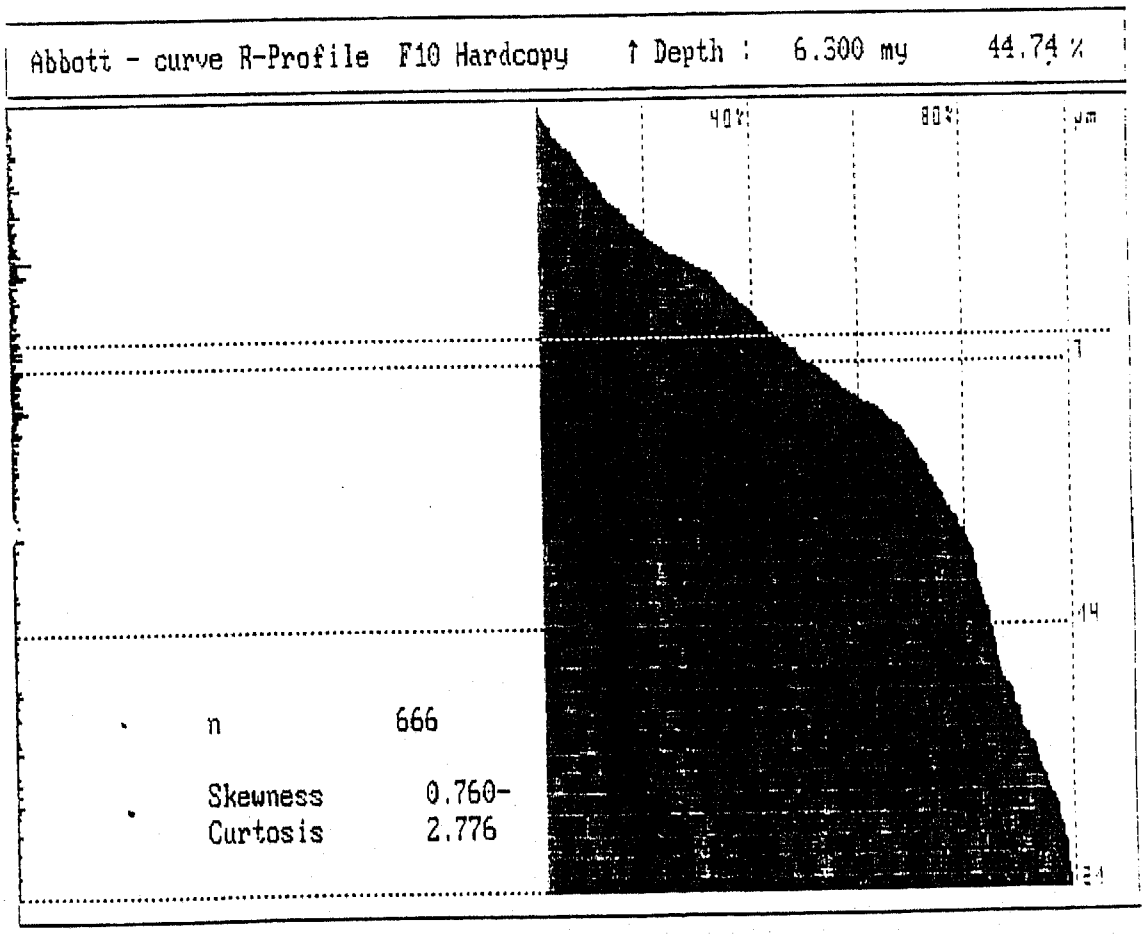


Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Patim TiN
Morada	: Revestimentos	Designacao	: E1
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 4 Outubro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 4.80 mm	cut - off	: 0.800 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
5	21.030	20.730	18.640	3.970	0.50	0.280	12.270	7.350

Mr2
80.90

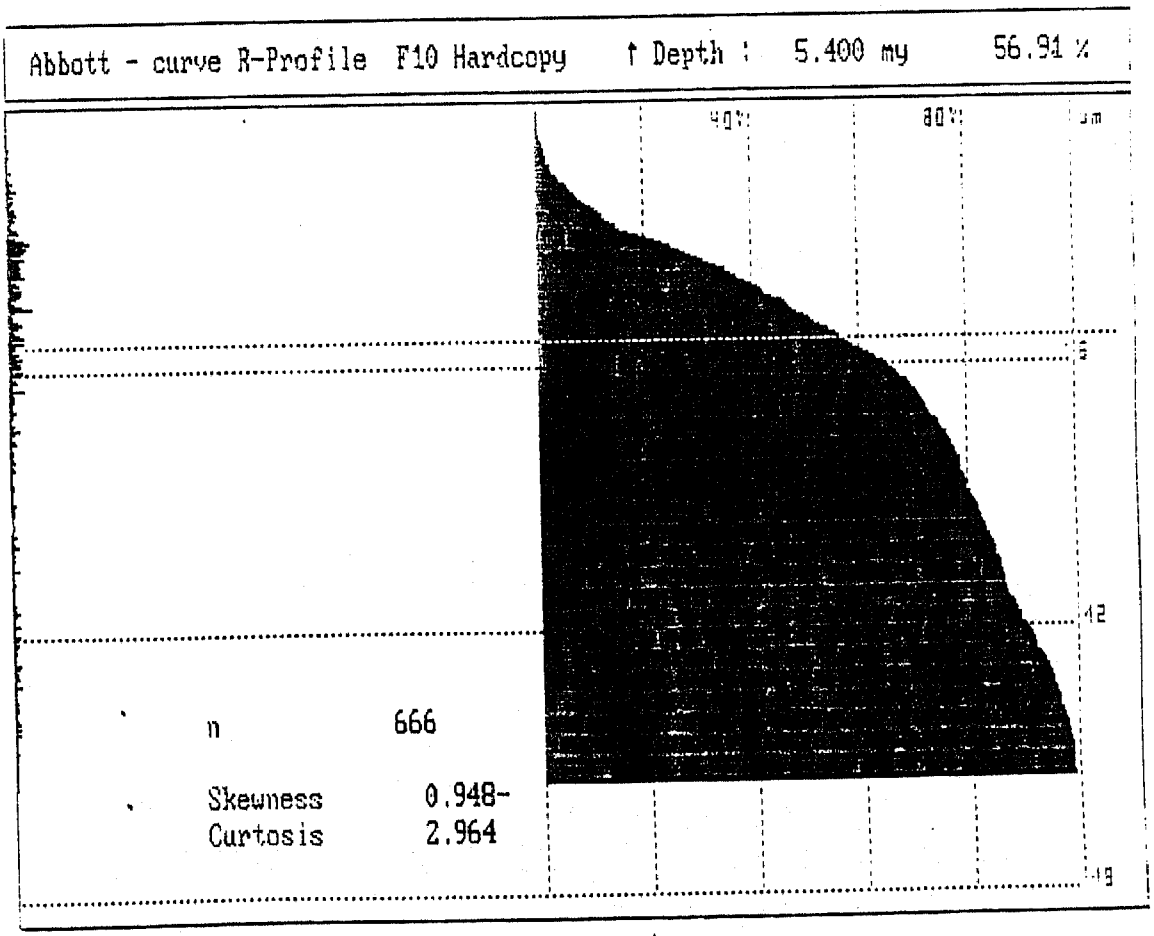


Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Patim (TiZr)N
Morada	: Revestimentos	Designacao	: E27
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 8 Novembro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 4.80 mm	cut - off	: 0.800 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
4	16.070	16.070	14.220	2.740	2.90	0.980	6.370	6.490

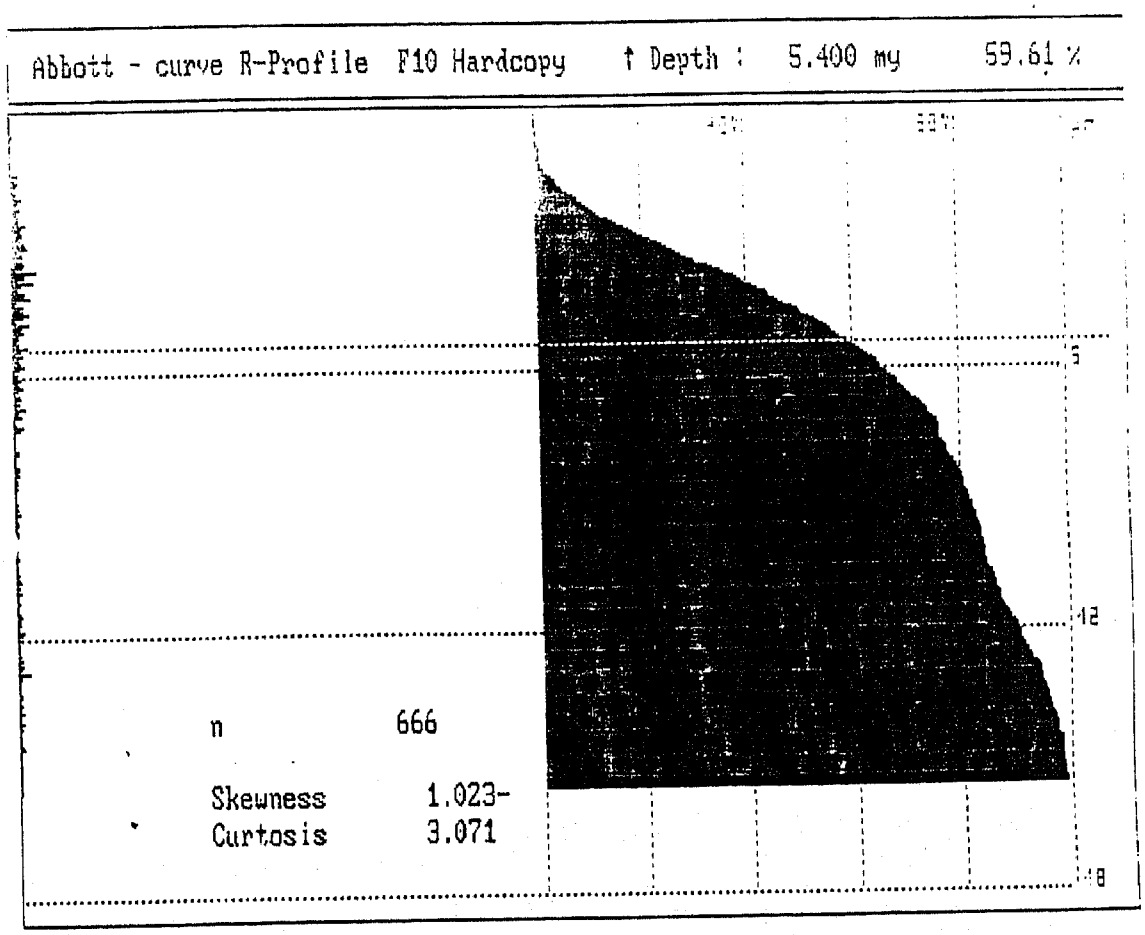
Mr2
75.60



Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Patim (TiZr)N
Morada	: Revestimentos	Designacao	: E27
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 8 Novembro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 4.80 mm	cut - off	: 0.800 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

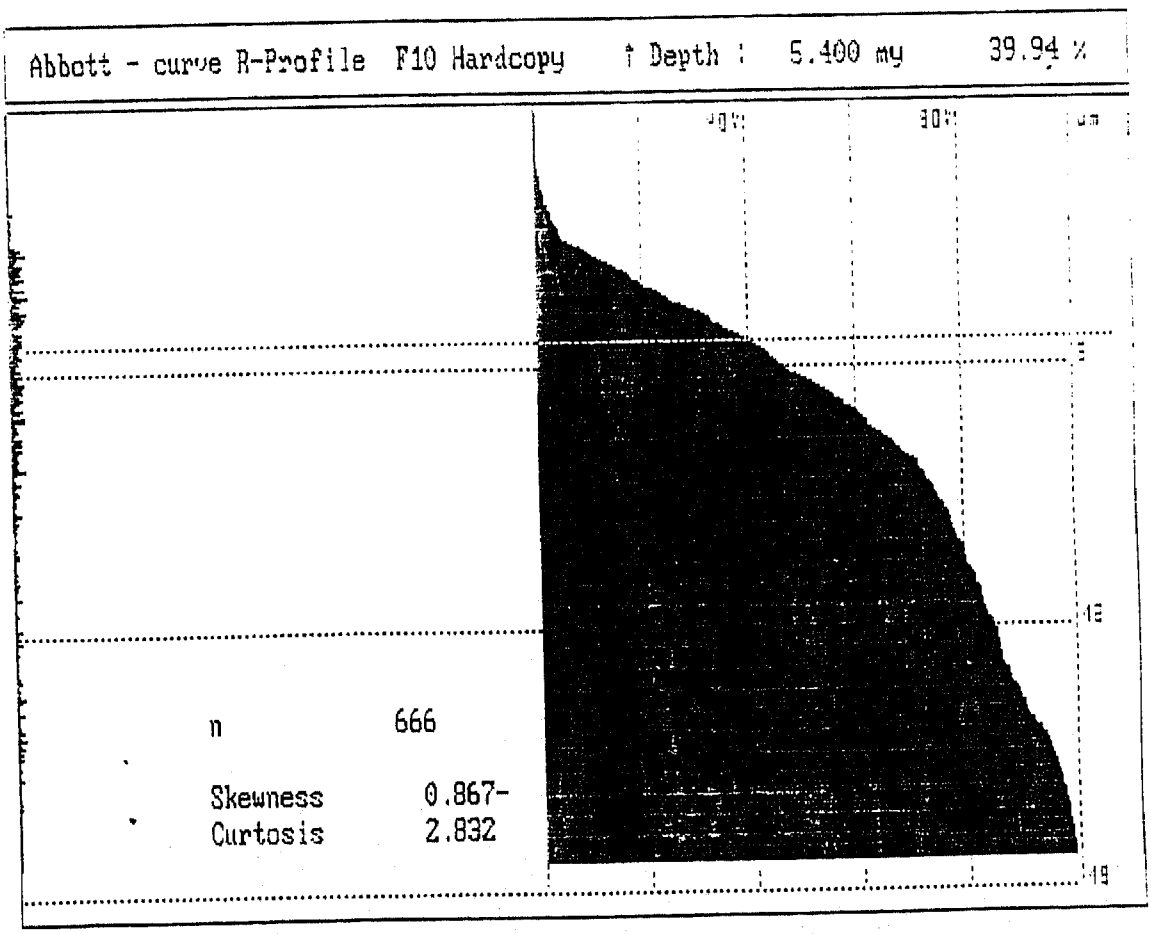
Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
5	15.480	15.070	14.310	2.750	2.30	0.860	6.320	7.180
	Mr2							
	77.20							



Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Patim (TiZr)N
Morada	: Revestimentos	Designacao	: E27
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 8 Novembro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 4.80 mm	cut - off	: 0.800 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
6	17.780	17.720	15.640	2.930	3.30	1.400	6.500	7.340
	Mr2							
	76.70							

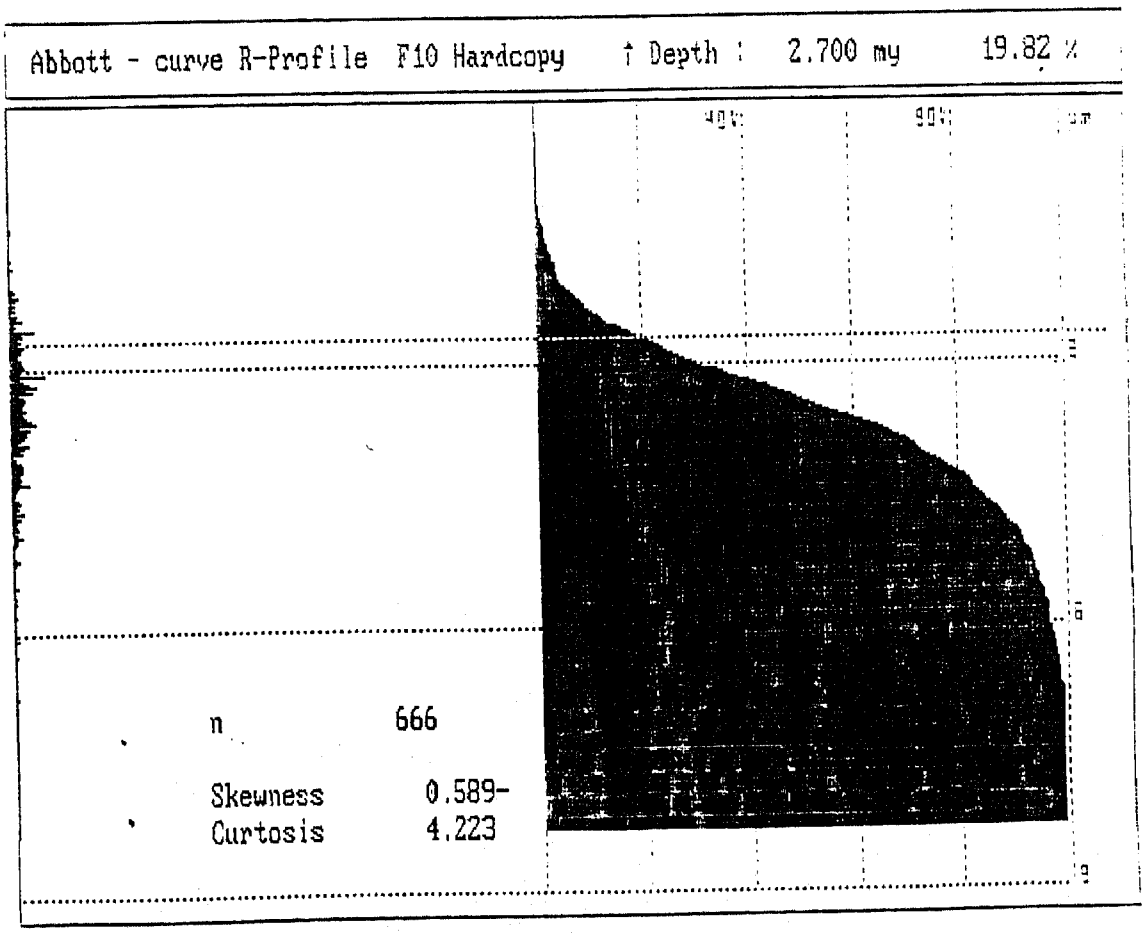


Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Pista ZrN
Morada	: Revestimentos	Designacao	: P9
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 8 Novembro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 15.00 mm	cut - off	: 2.500 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
2	9.560	8.550	7.070	0.760	8.20	1.070	2.170	1.620

Mr2
85.30

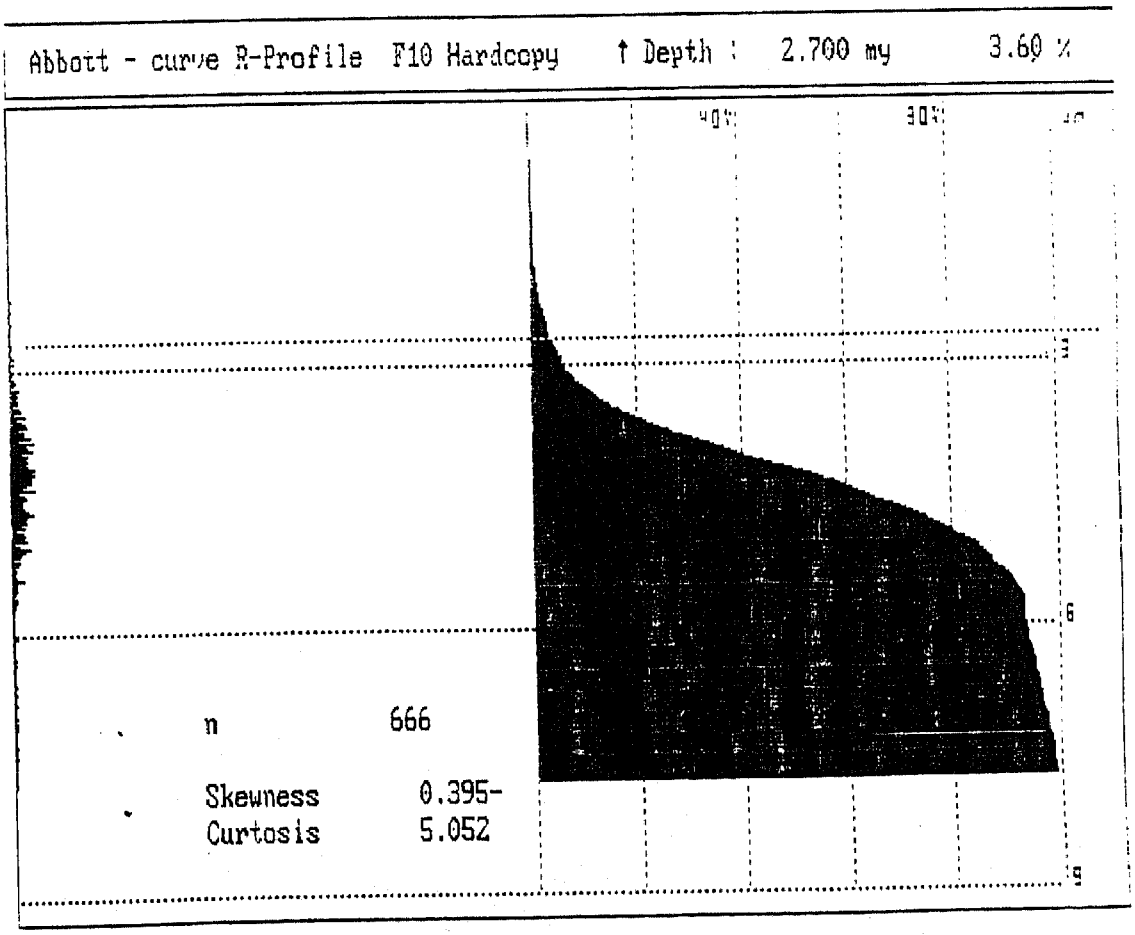


Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Pista ZrN
Morada	: Revestimentos	Designacao	: P9
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 8 Novembro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 15.00 mm	cut - off	: 2.500 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
3	9.760	8.790	7.510	0.710	9.80	1.250	1.920	1.67

Mr2
86.30

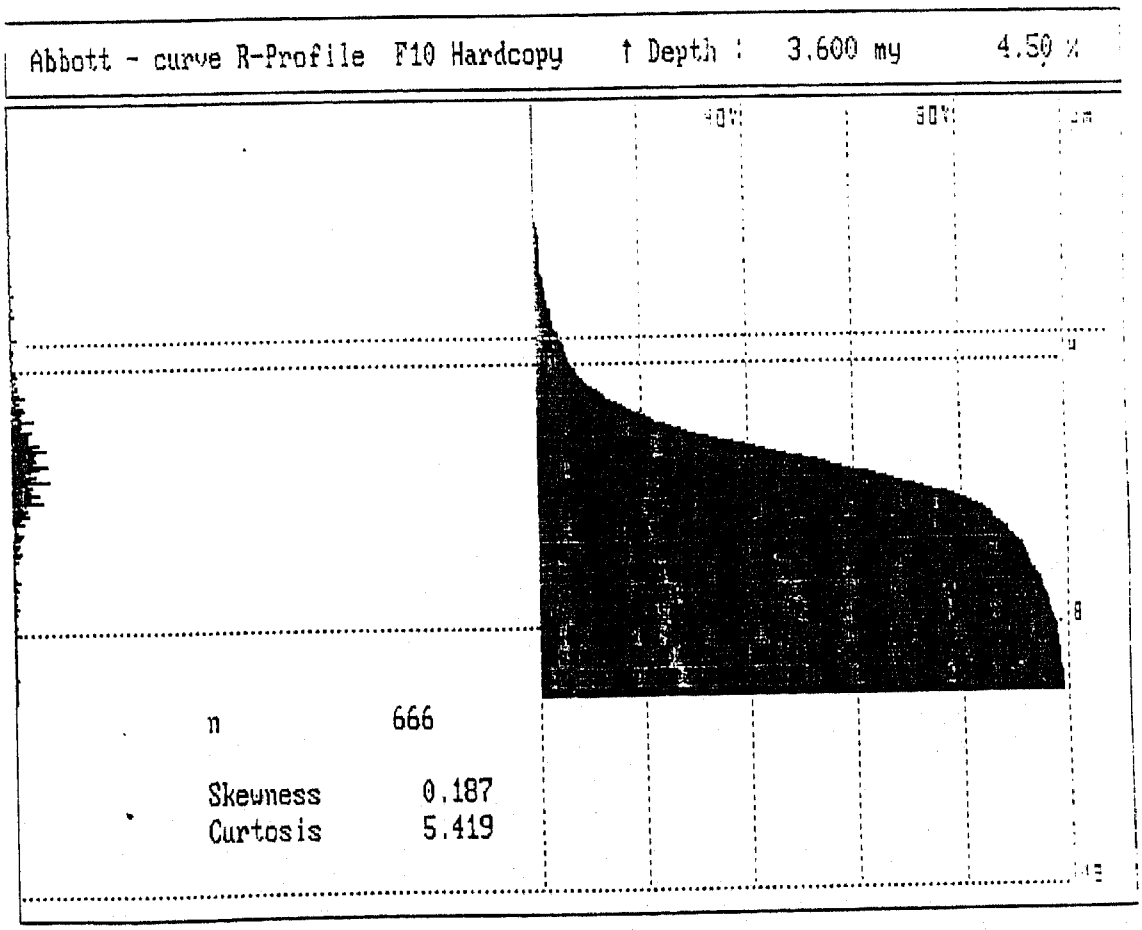


Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Pista ZrN
Morada	: Revestimentos	Designacao	: P9
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 8 Novembro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 15.00 mm	cut - off	: 2.500 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
4	11.080	9.460	8.530	0.730	11.00	1.540	1.970	1.750

Mr2
87.10

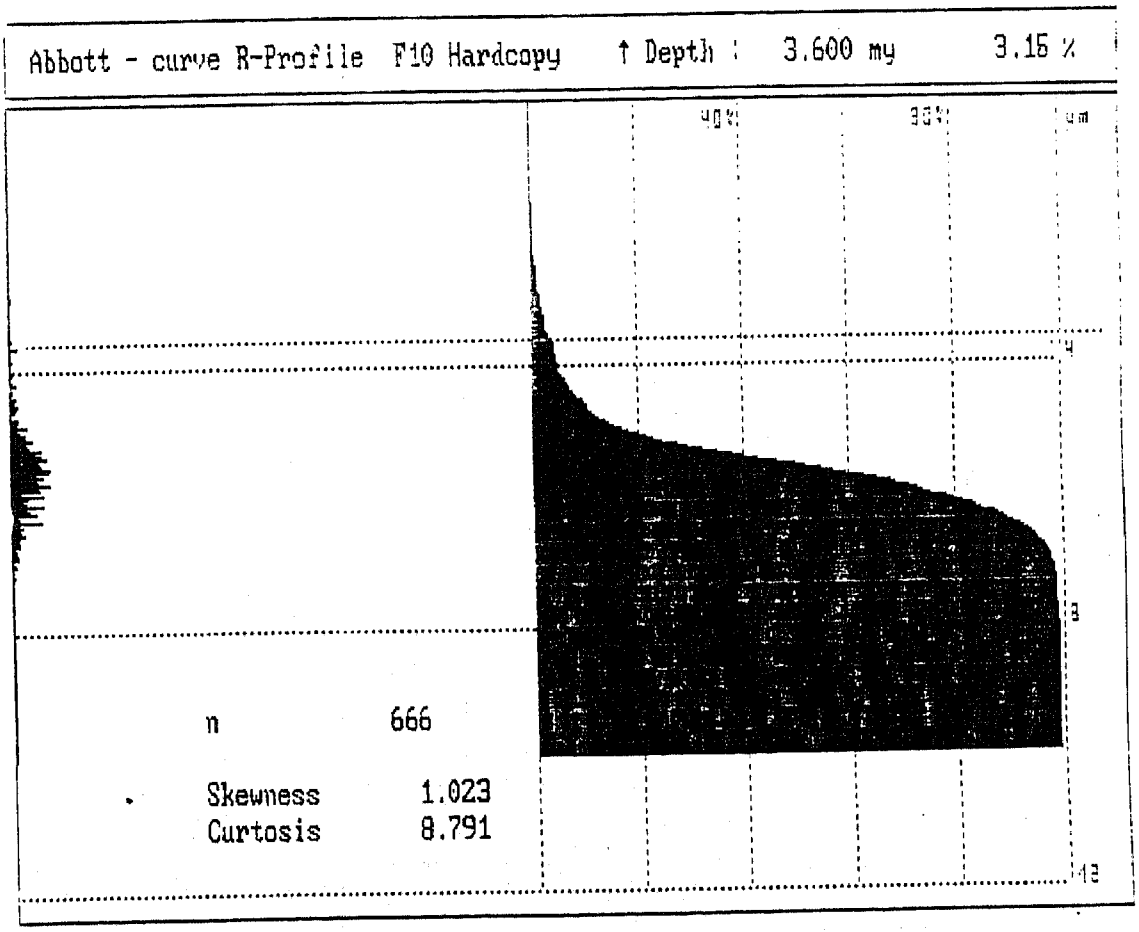


Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Pista (TiZr)N
Morada	: Revestimentos	Designacao	: P10
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 8 Novembro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 15.00 mm	cut - off	: 2.500 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
5	10.480	8.660	7.730	0.560	10.80	1.630	1.620	0.830

Mr2
88.40

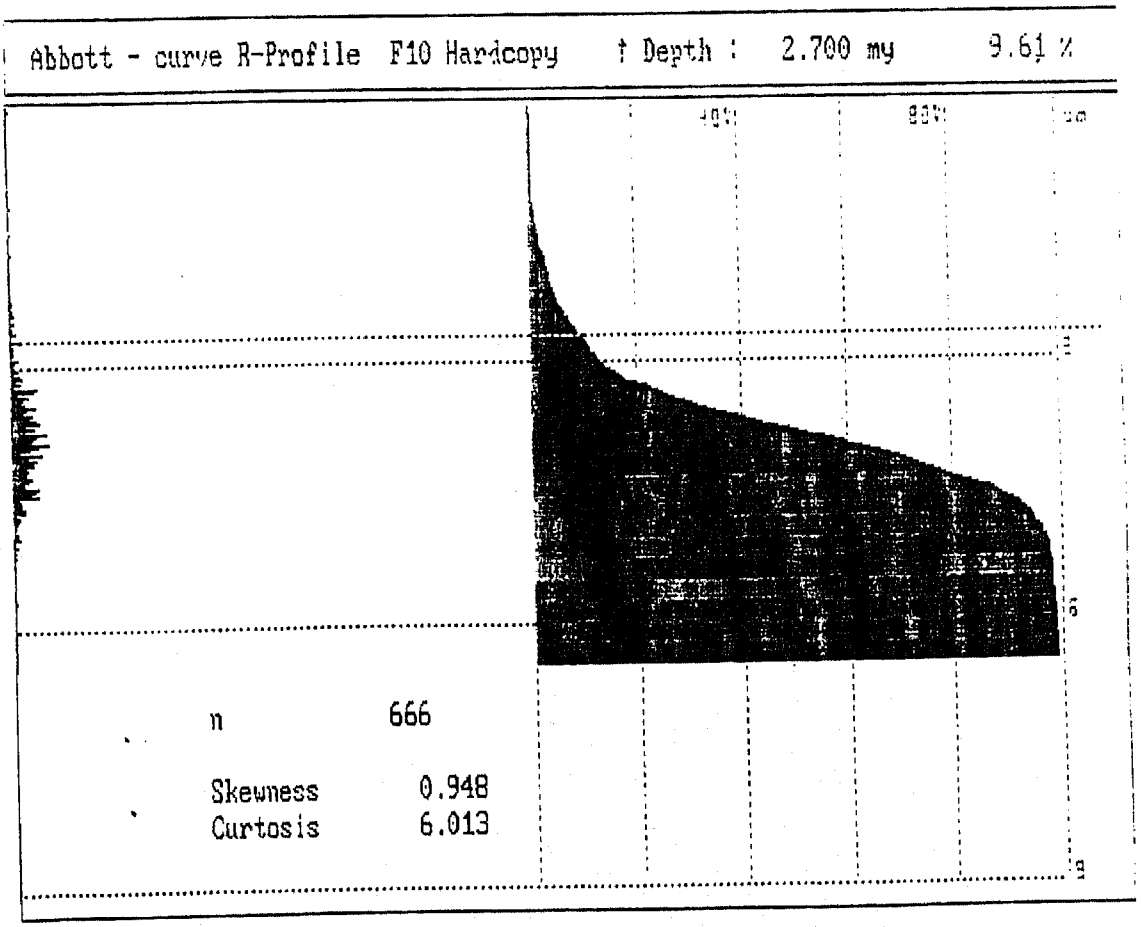


Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Pista (TiZr)N
Morada	: Revestimentos	Designacao	: P10
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 8 Novembro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 15.00 mm	cut - off	: 2.500 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
6	11.060	10.010	7.630	0.540	11.20	1.330	1.550	0.850

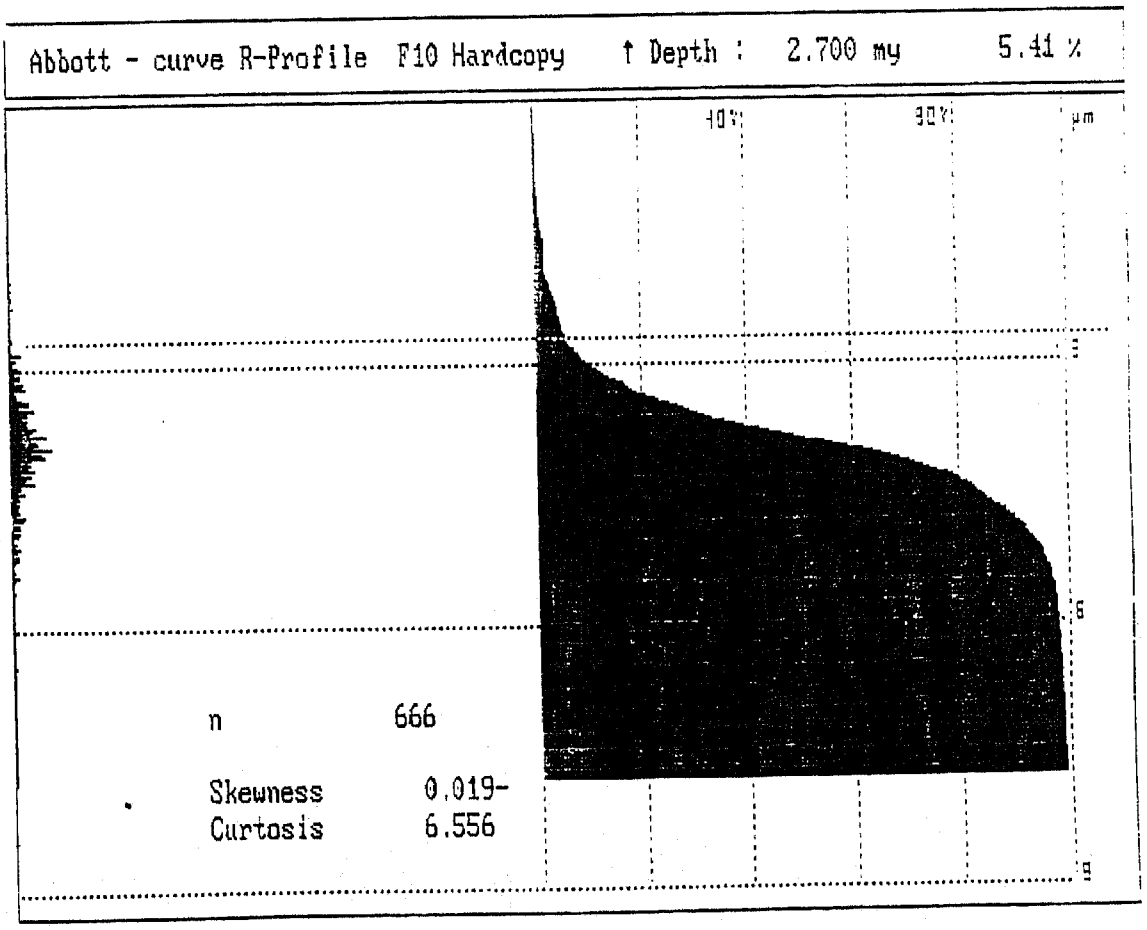
Mr2
89.70



Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Pista (TiZr)N
Morada	: Revestimentos	Designacao	: P10
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 8 Novembro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 15.00 mm	cut - off	: 2.500 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
7	9.110	8.090	6.900	0.560	11.30	1.320	1.550	1.080
	Mr2							
	86.90							

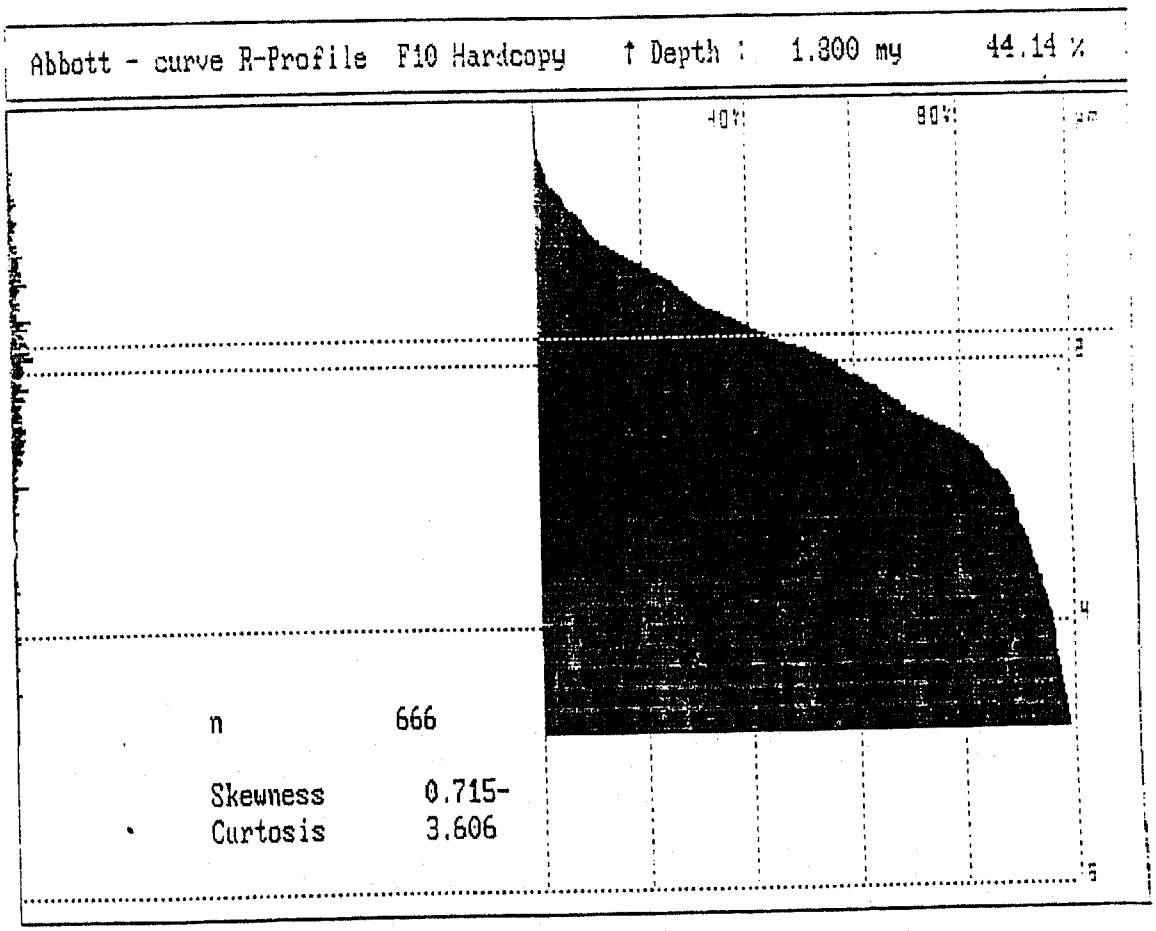


Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Pista C220
Morada	: Revestimentos	Designacao	: 1
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 4 Outubro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 15.00 mm	cut - off	: 2.500 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
22	4.960	4.960	4.660	0.690	7.20	0.600	2.050	1.480

Mr2
86.30

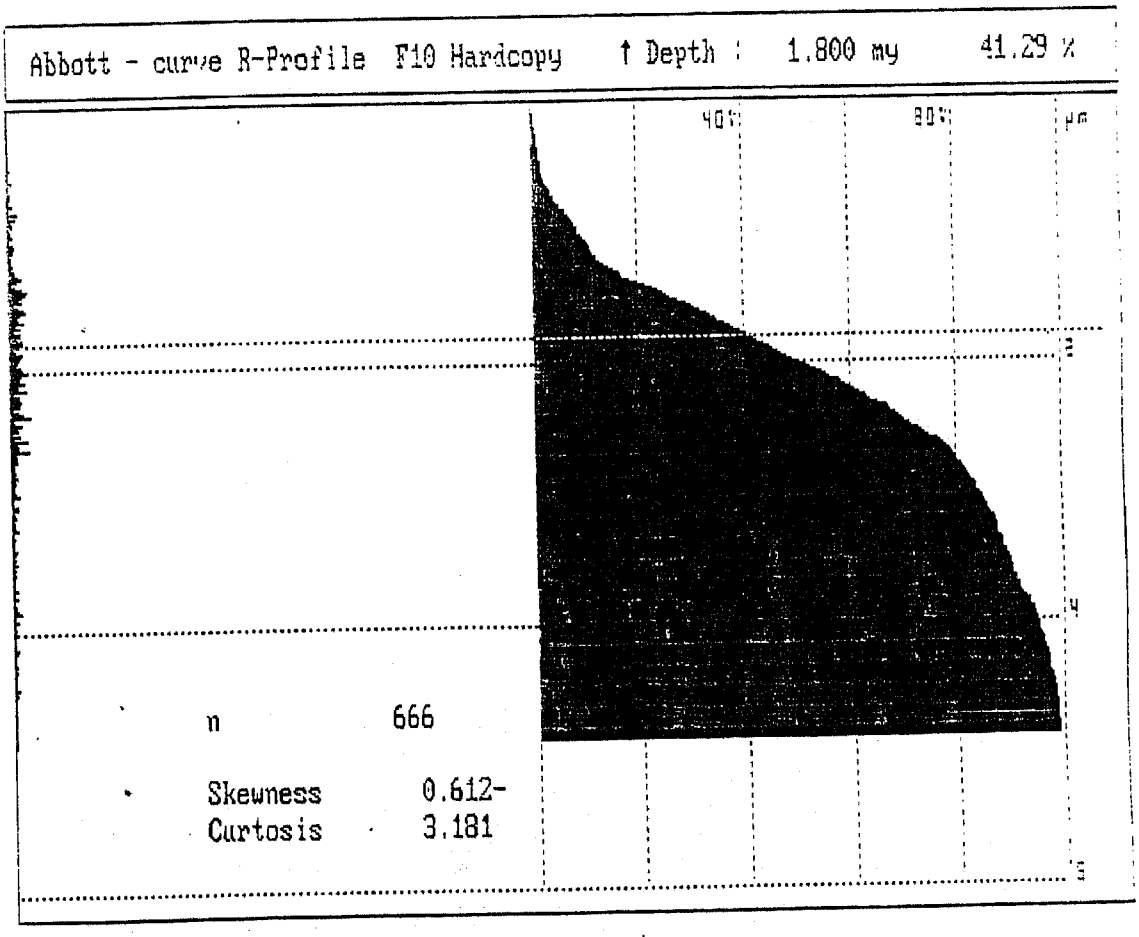


Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Pista C220
Morada	: Revestimentos	Designacao	: 1
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 4 Outubro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 15.00 mm	cut - off	: 2.500 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
23	5.580	5.480	5.010	0.700	7.90	0.640	1.970	1.680

Mr2
85.60

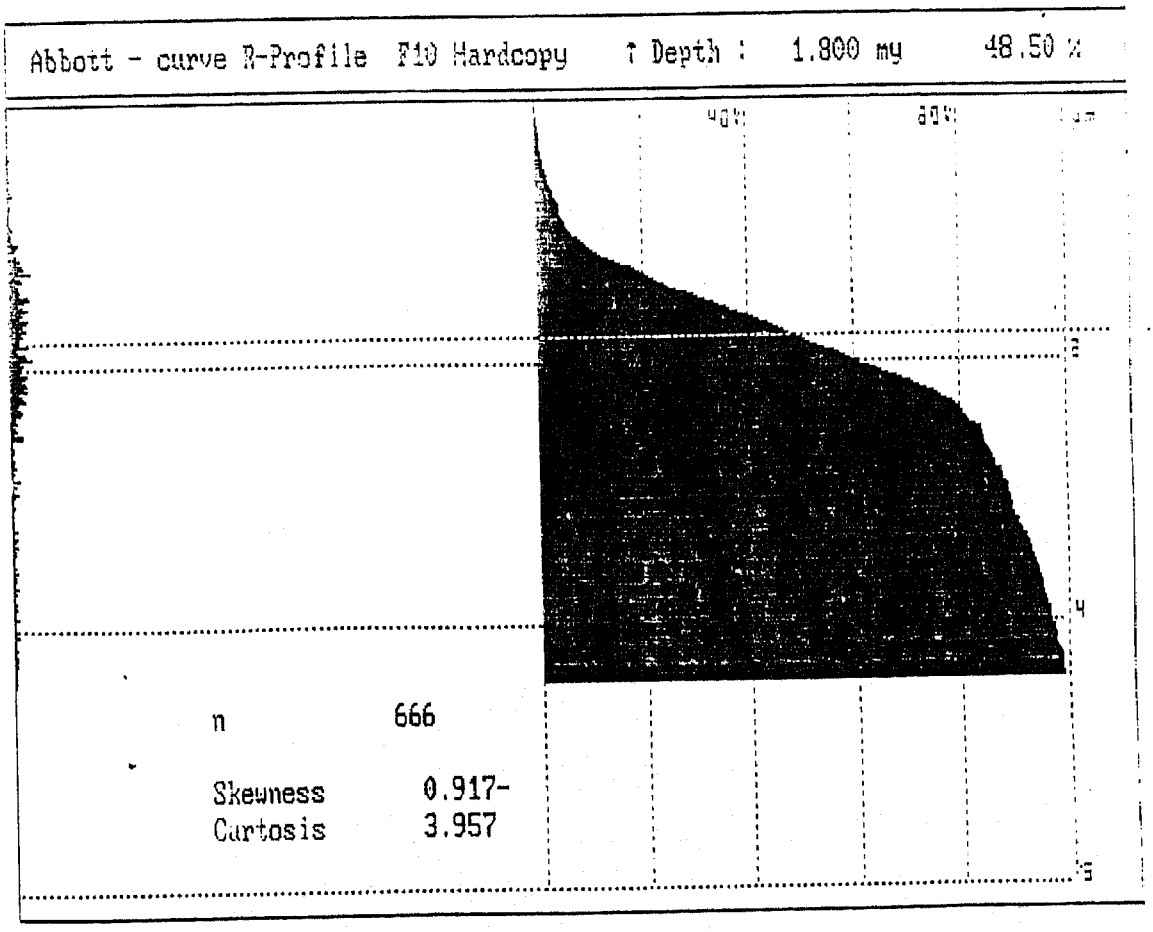


Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Pista C220
Morada	: Revestimentos	Designacao	: 1
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 4 Outubro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 15.00 mm	cut - off	: 2.500 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
24	5.130	5.100	4.610	0.600	7.40	0.710	1.620	1.590

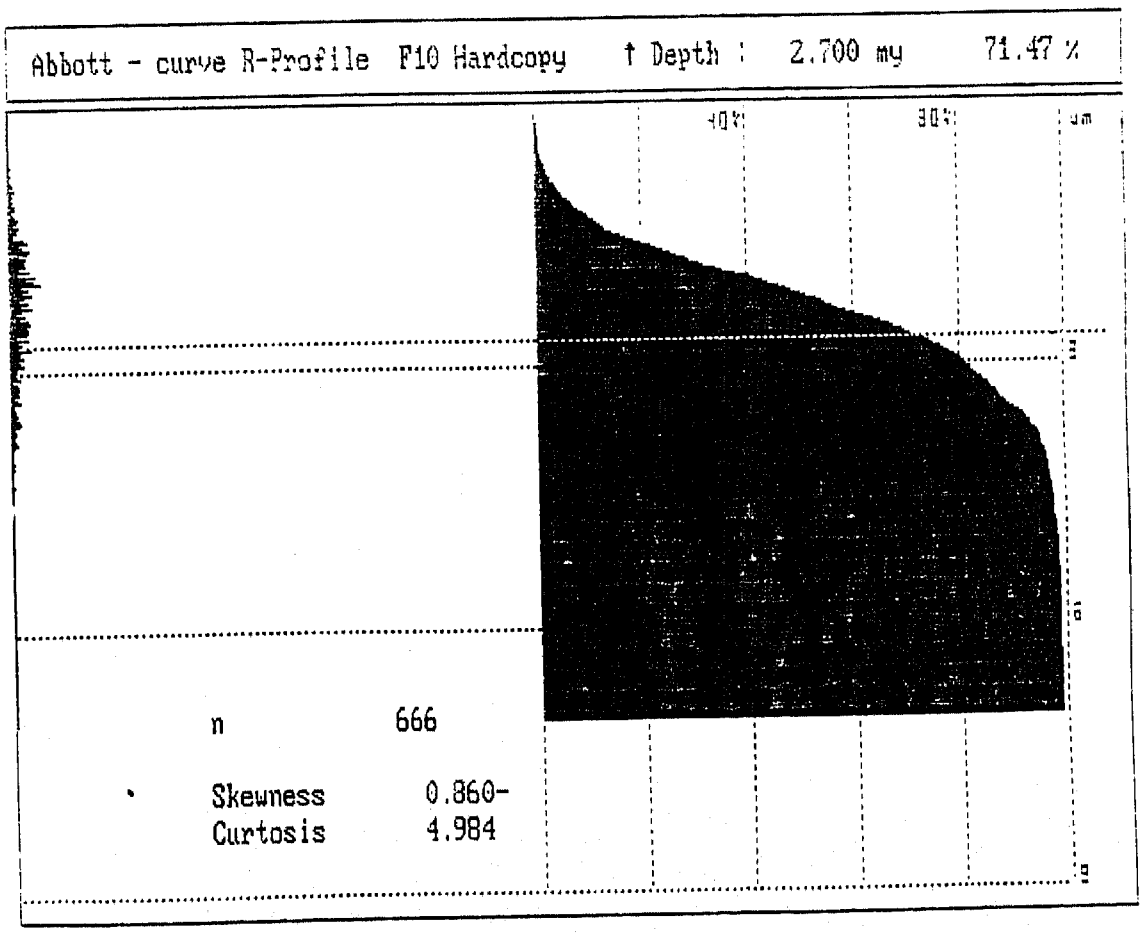
Mr2
84.00



Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Pista TiN
Morada	: Revestimentos	Designacao	: 24
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 4 Outubro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 15.00 mm	cut - off	: 2.500 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

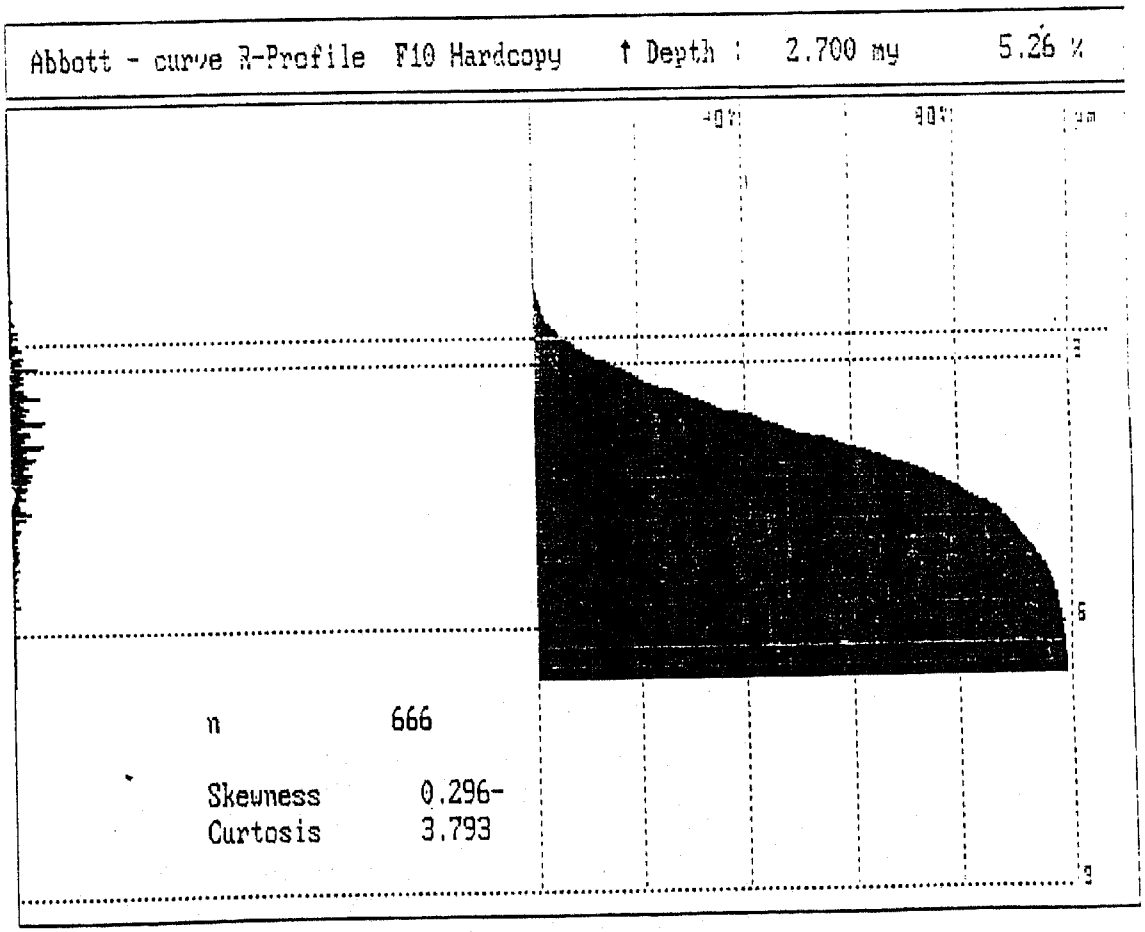
Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
16	9.610	8.460	7.070	0.680	8.10	0.760	2.000	1.250
	Mr2							
	86.60							



Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Pista TiN
Morada	: Revestimentos	Designacao	: 24
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 4 Outubro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 15.00 mm	cut - off	: 2.500 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

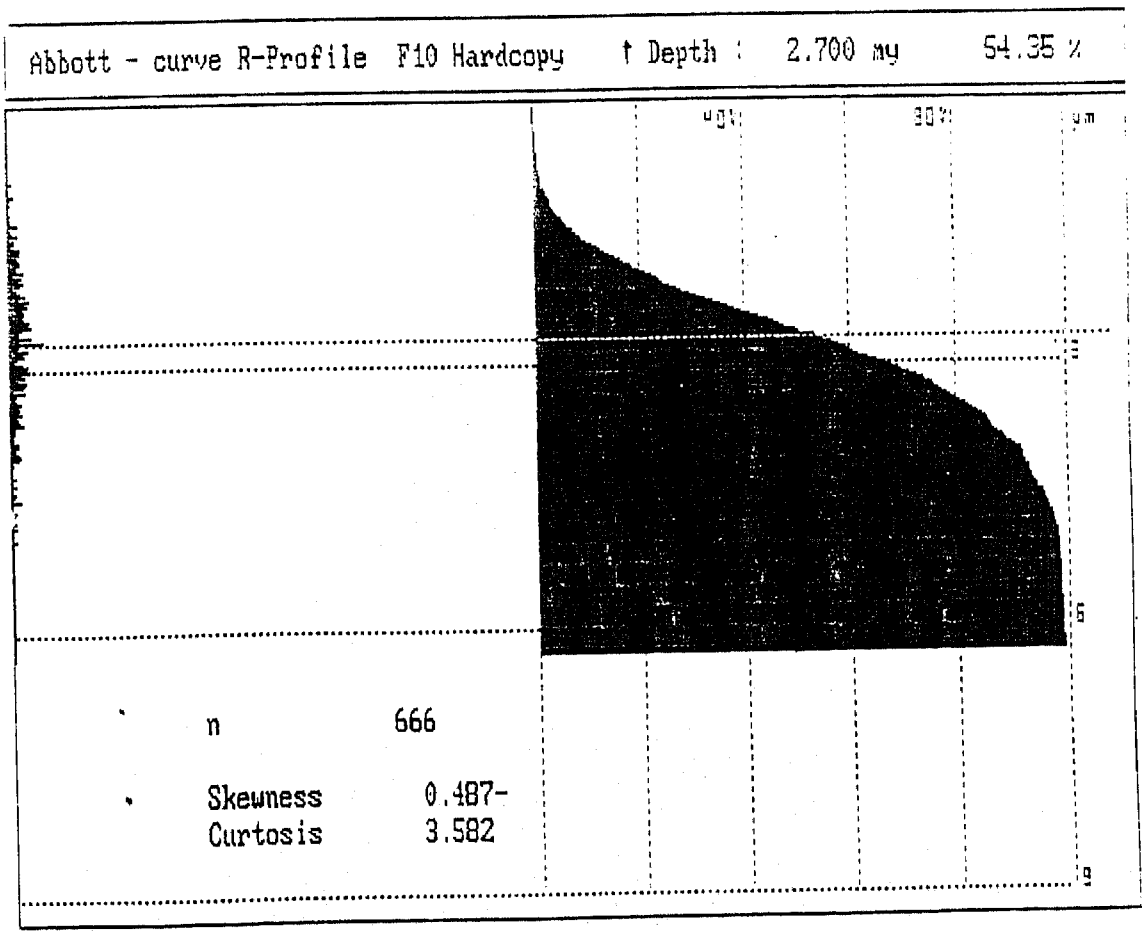
Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
17	7.680	6.240	5.470	0.610	7.80	0.610	1.970	1.160
	Mr2							
	86.70							



Inspection - Report

Empresa	: T. Mestrado	Provete	: Pista TiN
Morada	: Revestimentos	Designacao	: 24
	: PVD		: Direccao transv.
Telefone	:		:
Fax	:	Data	: 4 Outubro 1996
Range	: 80.0 µm	Traverse speed	: 0.50 mm/sec
Traverse length	: 15.00 mm	cut - off	: 2.500 mm
Filter type	: RC + M2	Standard	: DIN-ISO

Number	Rt	Rmax	Rz-D	Ra	Mr1	Rpk	Rk	Rvk
18	8.160	8.160	6.040	0.700	6.40	0.610	2.300	1.280
	Mr2							
	88.80							

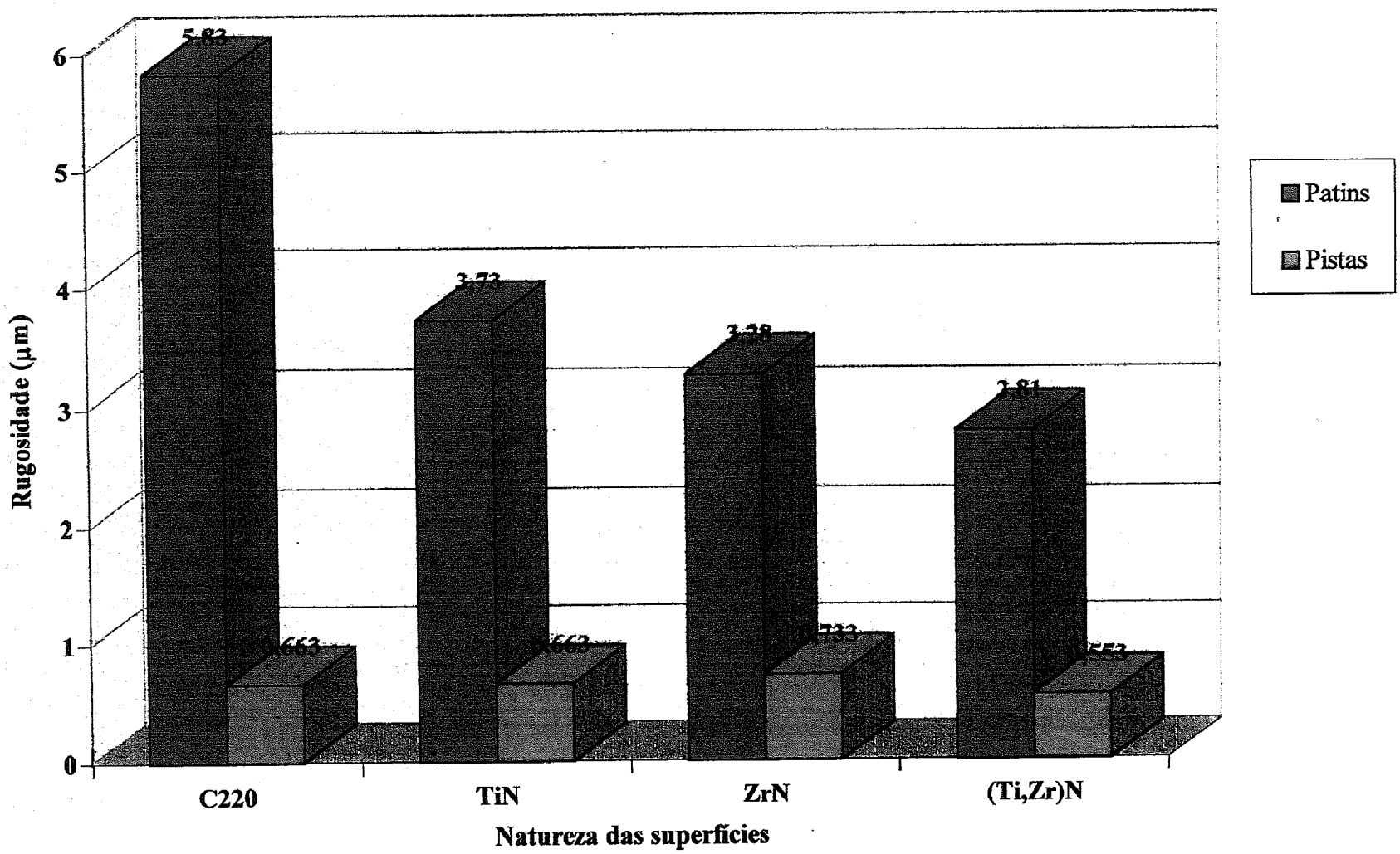


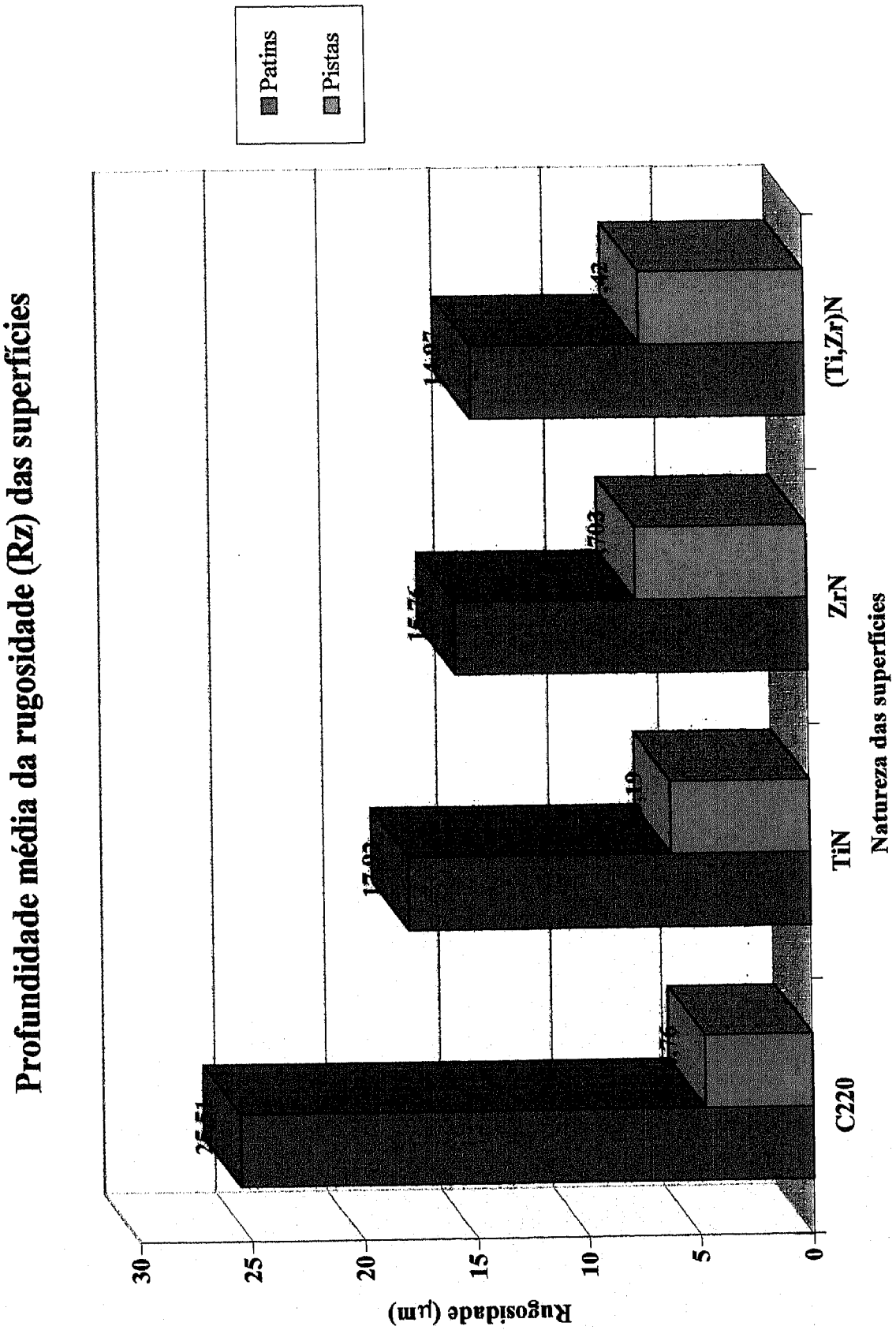
ANEXO

D

COMPARAÇÃO DE RUGOSIDADES DAS SUPERFÍCIES

Profundidade média da rugosidade (Ra) das superfícies




Profundidade média da rugosidade (Rz) das superfícies
Patins
Pistas
Rugosidade (µm)
0
5
10
15
20
25
30
C220
TiN
ZrN
(Ti,Zr)N
Natureza das superfícies

ANEXO

E

RELATÓRIOS DE ENSAIO

RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

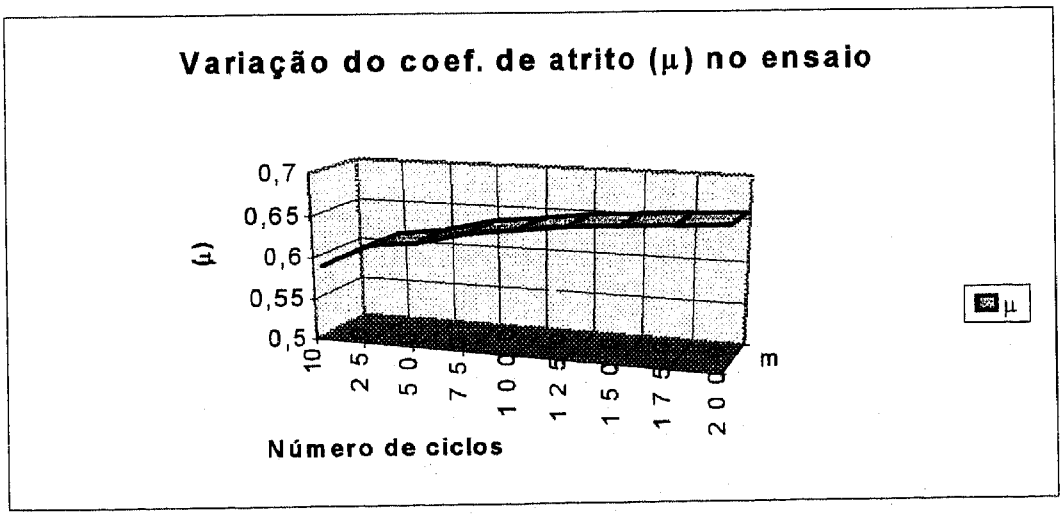
Ensaio Nº	1	
Data :	96/11/12	
Temperatura Ambiente :	19	°C
Humidade do Ar :	77	%
Superfície da Pista :	C220	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/920	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	1,5	mg
Força de atrito inicial :	41	N

Fenómenos observados

Ligeiros sintomas de desgaste no patim , distribuido de forma uniforme por todos os picos . Desgaste visivel na pista , sob a forma de sulcos correspondentes aos picos do patim .A força de atrito sofreu um maior incremento desde os 250 ciclos até aos 1000 ciclos , causada pela libertação de partículas de desgaste no contacto . Não se verificou transferência do material entre a pista e o patim .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

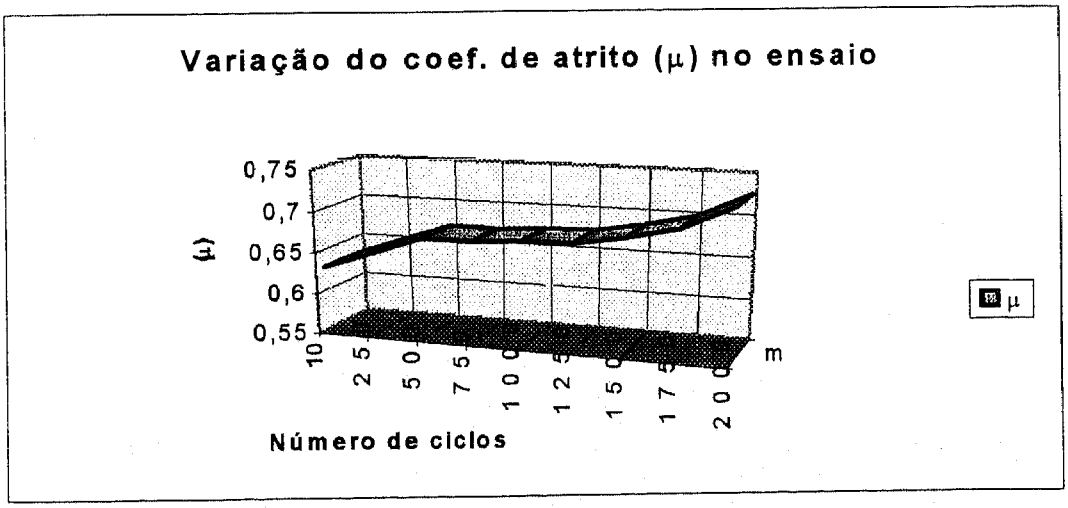
Ensaio Nº	2	
Data :	96/11/12	
Temperatura Ambiente :	19	ºC
Humidade do Ar :	76	%
Superfície da Pista :	C220	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/920	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2	mg
Força de atrito inicial :	44	N

Fenómenos observados

Ligeiros sintomas de desgaste no patim , distribuídos uniformemente por todos os picos , sem rotura do revestimento . Desgaste da pista mais acentuado a esta velocidade do que a 1m/s. Maior coeficiente de atrito inicial , sendo no decorrer do ensaio perturbado de forma significativa pela libertação de partículas de desgaste , particularmente na fase final do ensaio. Não se verificou transferência de material entre a pista e o patim , havendo indícios de início de gripagem na pista .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

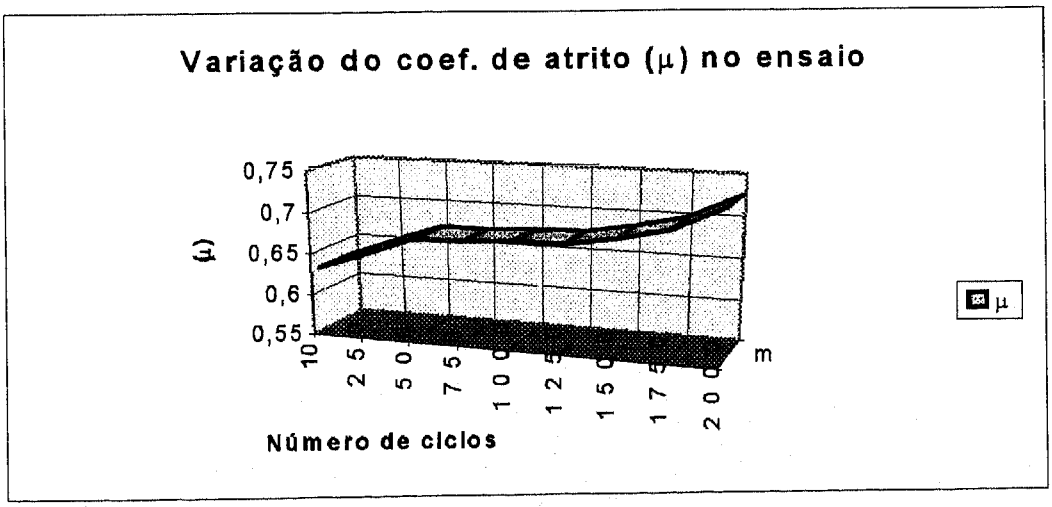
Ensaio Nº	3	
Data :	96/11/12	
Temperatura Ambiente :	19	ºC
Humidade do Ar :	76	%
Superfície da Pista :	C220	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/920	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,2	mg
Força de atrito inicial :	38	N

Fenómenos observados

Sintomas de desgaste no patim , sem indícios de rotura do revestimento nos picos de rugosidade do patim . Desgaste da pista visível , sob a forma de sulcos .
Coeficiente de atrito inicial mais moderado , com incrementos provocados pela libertação de partículas de desgaste até aos 1250 ciclos , e posterior subida moderada .
Não se verificou transferência de material entre a pista e o patim .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

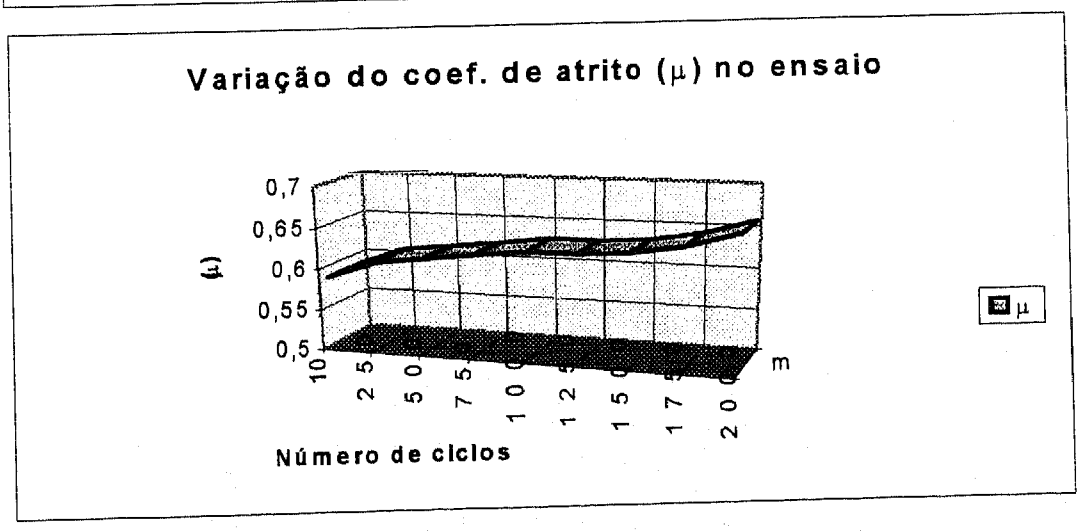
Ensaio Nº	4	
Data :	96/11/12	
Temperatura Ambiente :	20	°C
Humidade do Ar :	76	%
Superfície da Pista :	C220	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/920	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,9	mg
Força de atrito inicial :	41	N

Fenómenos observados

Rotura ligeira do revestimento em alguns picos de rugosidades do patim . Desgaste da pista sob a forma de sulcos , correspondentes aos picos de rugosidade do patim .
O coeficiente de atrito subiu durante os primeiros 1000 ciclos , por libertação de partículas de desgaste , estabilizou até aos 1500 ciclos , e voltou depois a subir , quando se verificou o início de rotura do revestimento .
Verificou transferência de material do patim para a pista .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

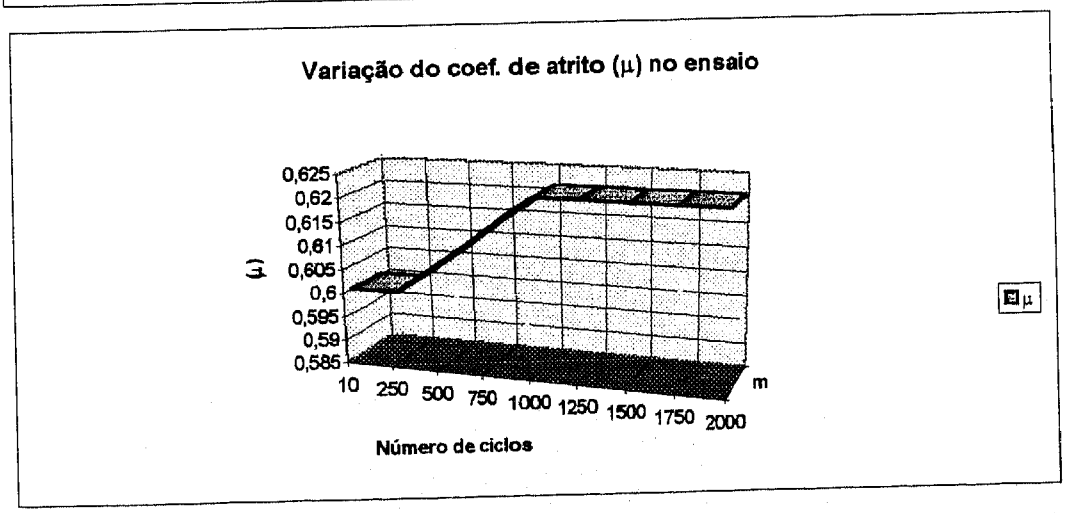
Ensaio Nº	5	
Data :	96/11/12	
Temperatura Ambiente :	20	°C
Humidade do Ar :	74	%
Superfície da Pista :	C220	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/920	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	1,5	mg
Força de atrito inicial :	42	N

Fenómenos observados

Ligeiros sintomas de desgaste no patim , distribuídos uniformemente por todos os picos , sem rotura do revestimento . Desgaste da pista mais acentuado , sob a forma de sulcos , correspondentes aos picos da superfície do patim .
Estabilidade inicial do coeficiente de atrito , seguida de uma subida desde os 250 ciclos até aos 1000 ciclos , estabilizando apartir desse momento .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

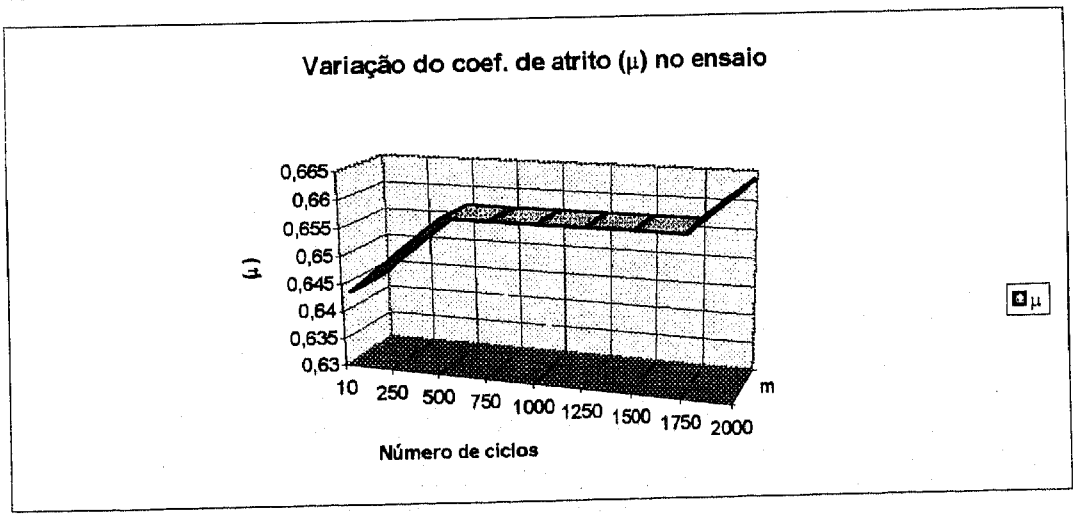
Ensaio Nº	6	
Data :	96/11/12	
Temperatura Ambiente :	20	°C
Humidade do Ar :	74	%
Superfície da Pista :	C220	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/920	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,3	mg
Força de atrito inicial :	45	N

Fenómenos observados

Alguns sintomas de desgaste no patim , distribuídos de forma não uniforme pelos picos do revestimento do patim, com rotura do revestimento em apenas alguns picos das estrias de maquinagem . Desgaste da pista acentuado , com marcas dos picos do patim .
O coeficiente de atrito subiu durante os primeiros 500 ciclos , estabilizando de seguida até aos 1600 ciclos , momento em que voltou a subir face ao inicio da rotura do revestimento do patim.
Não se verificou transferência de material entre a pista e o patim .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

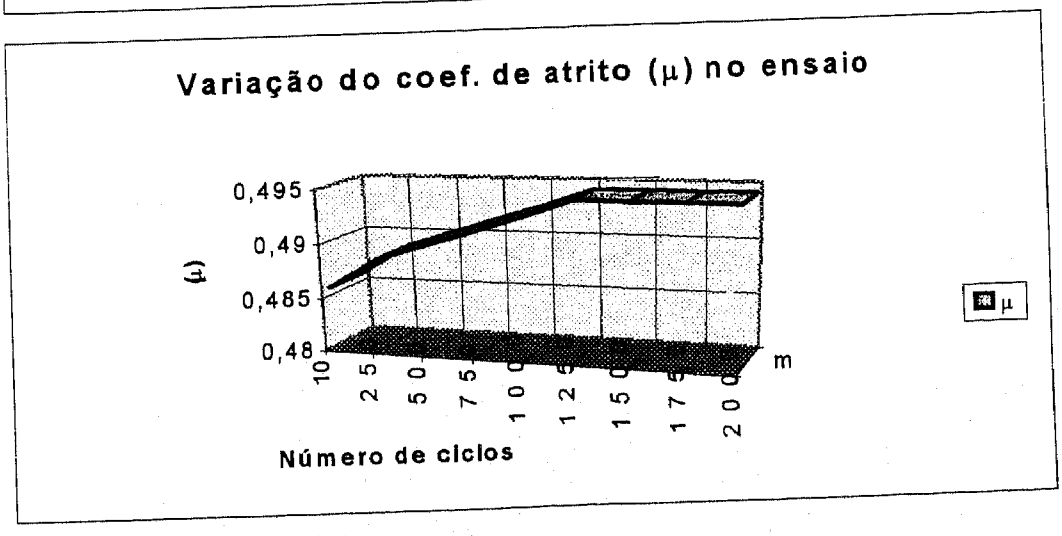
Ensaio Nº	7	
Data :	96/11/12	
Temperatura Ambiente :	20	°C
Humidade do Ar :	73	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/1960	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	1,8	mg
Força de atrito inicial :	34	N

Fenómenos observados

Ligeiros sintomas de desgaste no patim , distribuídos uniformemente por todos os picos , sem rotura do revestimento . Desgaste da pista muito brando , com marcas ligeiras do contacto com os picos do revestimento do patim .
O coeficiente de atrito manteve-se quase constante ao longo dos 2000 ciclos do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

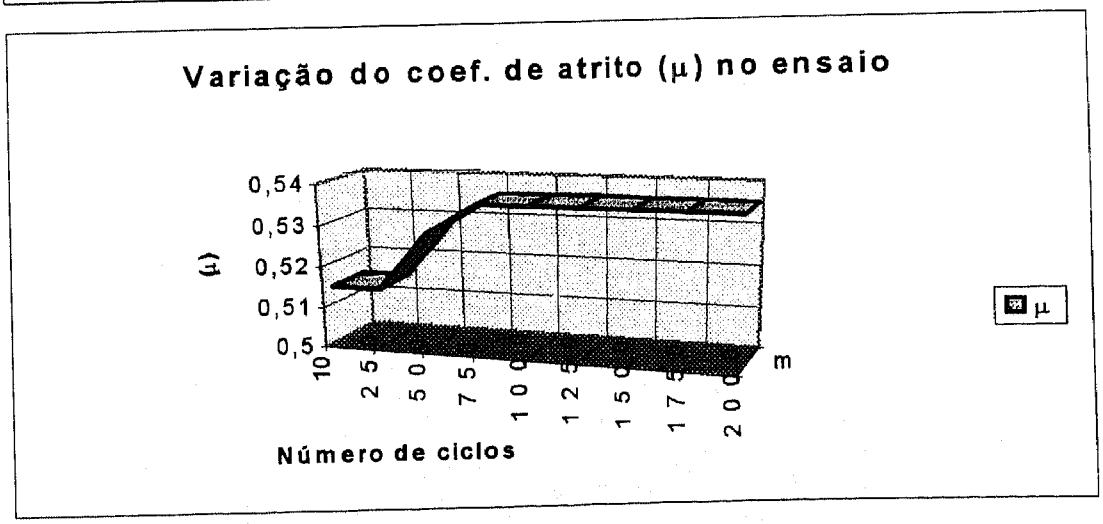
Ensaio Nº	8	
Data :	96/11/13	
Temperatura Ambiente :	17	ºC
Humidade do Ar :	83	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/1960	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,2	mg
Força de atrito inicial :	36	N

Fenómenos observados

Sintomas de desgaste no patim , distribuídos uniformemente por todos os picos , sem rotura do revestimento . Desgaste da pista perceptível , mas sem rotura do revestimento . O coeficiente de atrito manteve-se estável até aos 300 ciclos , verificando-se uma subida mais acentuada entre os 600 e 800 ciclos , adquirindo alguma estabilidade até ao fianl do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

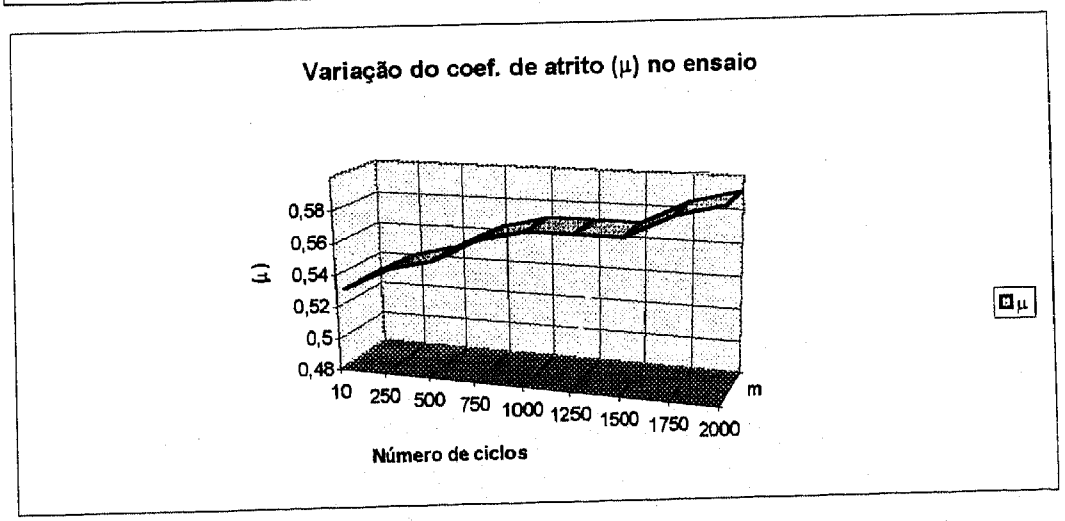
Ensaio Nº	9	
Data :	96/12/13	
Temperatura Ambiente :	17	°C
Humidade do Ar :	82	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/1960	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	3,2	mg
Força de atrito inicial :	37	N

Fenómenos observados

Desgaste evidente do patim , com indícios de rotura do revestimento por todos os picos.
Desgaste visível da pista , com marcas de desgaste por abrasão (3º corpo) , na direcção do movimento , mas sem rotura do revestimento da pista .
O coeficiente de atrito subiu desde os 100 até 1000 ciclos , estabilizando até aos 1500 , momento em que se verificou nova subida , devida ao início da rotura do revestimento do patim .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

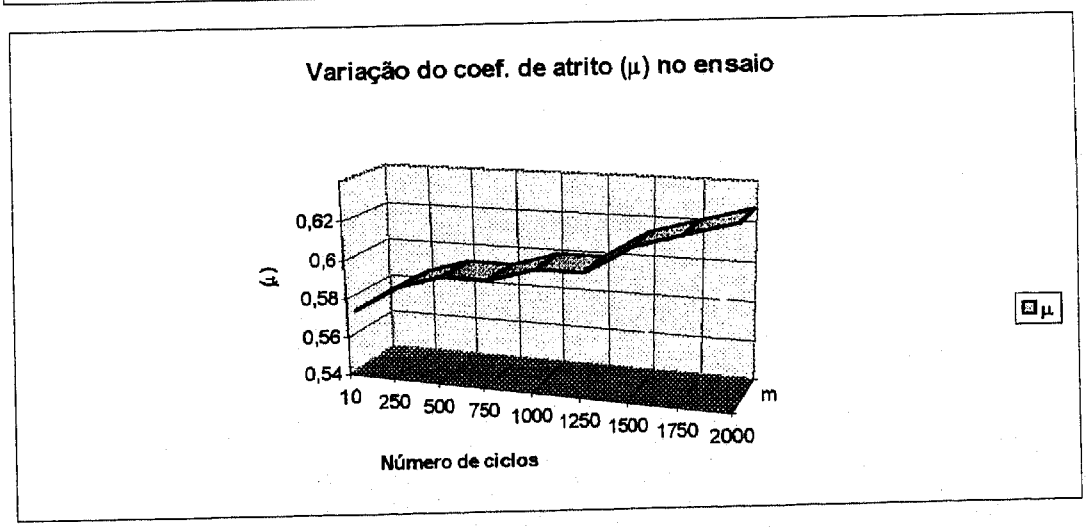
Ensaio Nº	10	
Data :	96/11/13	
Temperatura Ambiente :	17	°C
Humidade do Ar :	84	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/1960	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	3,9	mg
Força de atrito inicial :	40	N

Fenómenos observados

Desgaste pronunciado do revestimento do patim apartir dos picos , com rotura do revestimento e marcas de rotura por fadiga com crateras nítidas no revestimento do patim .
Ligeiros sintomas de desgaste na pista , com marcas de abrasão provocada por partículas de desgaste (3º corpo) , na direcção do movimento .
O coeficiente de atrito só abrandou o seu crescimento no intervalo entre a fase de libertação de pequenas partículas e a fase de rotura do revestimento do patim .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

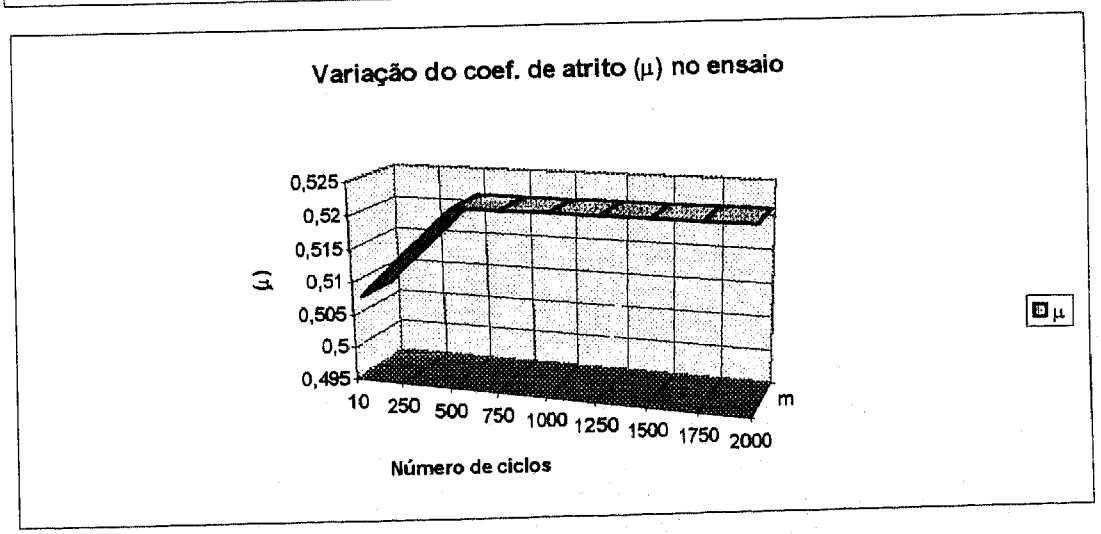
Ensaio Nº	11	
Data :	96/11/13	
Temperatura Ambiente :	18	°C
Humidade do Ar :	82	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/1960	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,1	mg
Força de atrito inicial :	35,5	N

Fenómenos observados

Ligeiros sintomas de desgaste no patim , distribuídos uniformemente por todos os picos , sem rotura do revestimento . Desgaste da pista muito ligeiro , com algumas marcas de abrasão provocadas pela libertação de partículas de desgaste do patim , muito pequenas .
O coeficiente de atrito subiu ligeiramente durante os primeros 500 ciclos , correspondendo à libertação das primeiras partículas de desgaste , e estabilizou apartir desse momento .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

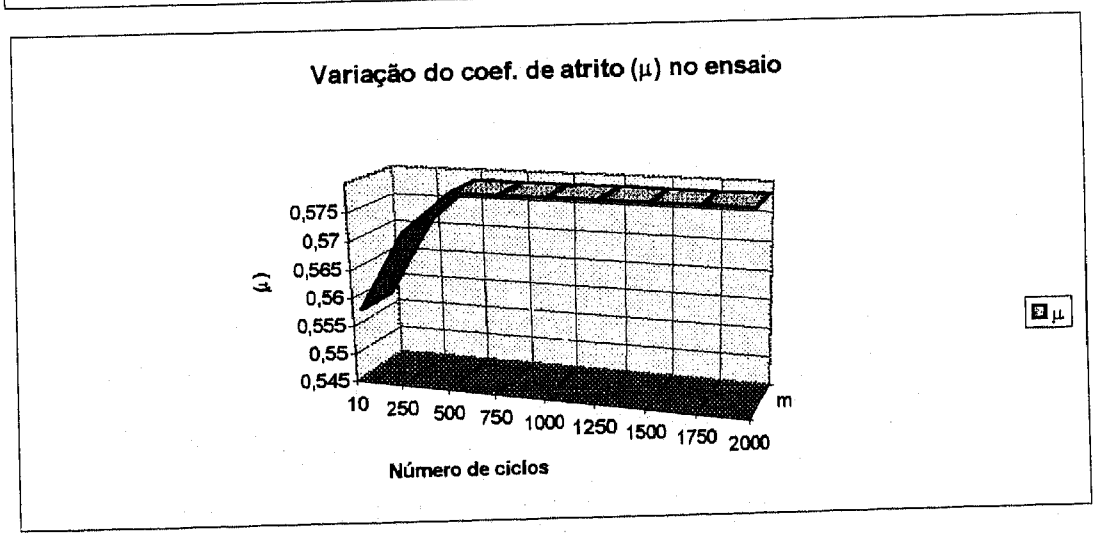
Ensaio Nº	12	
Data :	96/11/13	
Temperatura Ambiente :	18	ºC
Humidade do Ar :	82	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/1960	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,5	mg
Força de atrito inicial :	39	N

Fenómenos observados

Ligeiros sintomas de desgaste no patim , distribuídos uniformemente por todos os picos , com ligeiros vestígios de rotura do revestimento . Desgaste da pista mais acentuado a esta veloci-dade do que a 1m/s , mas sem que se verificasse rotura do revestimento da pista .
O coeficiente de atrito aumentou ligeiramente nos primeiros 500 ciclos , adquirindo estabilidade apartir desse momento .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

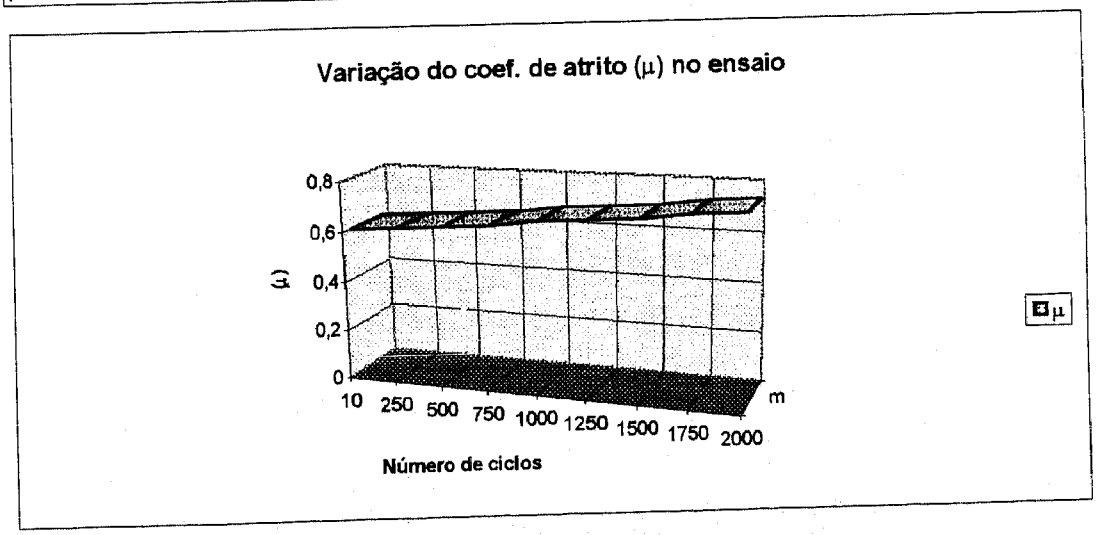
Ensaio Nº	13	
Data :	96/11/13	
Temperatura Ambiente :	18	°C
Humidade do Ar :	82	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	C220	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	5,83 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	920/1960	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	13,7	mg
Força de atrito inicial :	42	N

Fenómenos observados

O patim sofreu um desgaste apreciável . A topografia da superfície do patim foi completamente alterada , por alisamento de todos os picos relativos às estrias de maquinagem .
Na pista , verificaram-se apenas ligeiros sintomas de desgaste .
O coeficiente de atrito aumentou constantemente durante todo o ensaio , tendo aumentado de forma mais significativa aos 900 ciclos .Verificou-se transferência de material do patim para a pista , não se tendo verificado incrustações do revestimento da pista no patim .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

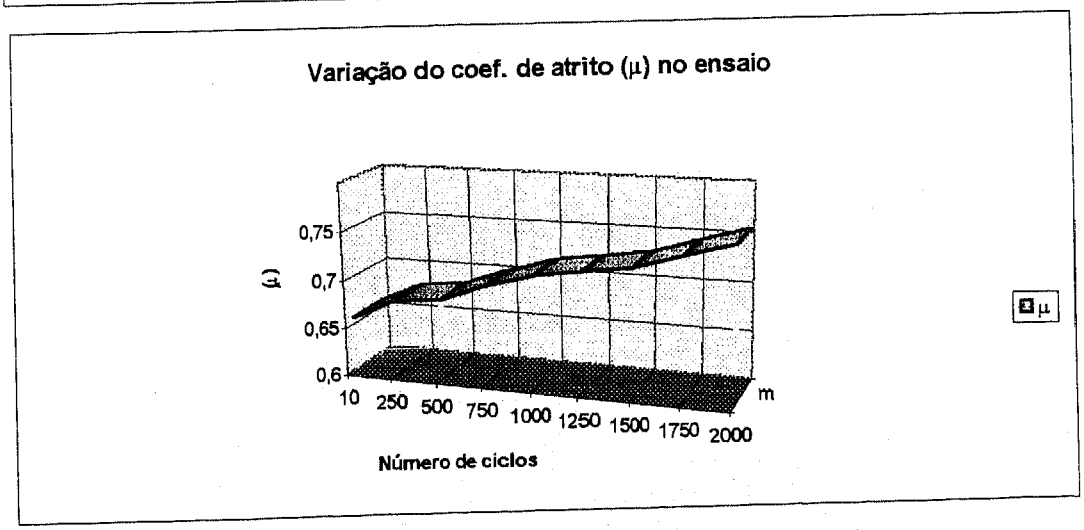
Ensaio Nº	14	
Data :	96/11/13	
Temperatura Ambiente :	18	ºC
Humidade do Ar :	83	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	C220	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	5,83 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	920/1960	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	14,8	mg
Força de atrito inicial :	46	N

Fenómenos observados

Desgaste muito acentuado da superfície do patim , com alisamento de todos os picos relativos às estrias de maquinagem . As partículas de desgaste do patim foram alojar-se parcialmente na superfície da pista , sendo esta transferência de material visível a olho nu .
A pista sofreu apenas um ligeiro desgaste .
O coeficiente de atrito subiu durante todo o ensaio , mostrando uma certa instabilidade em períodos de tempo muito curtos .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

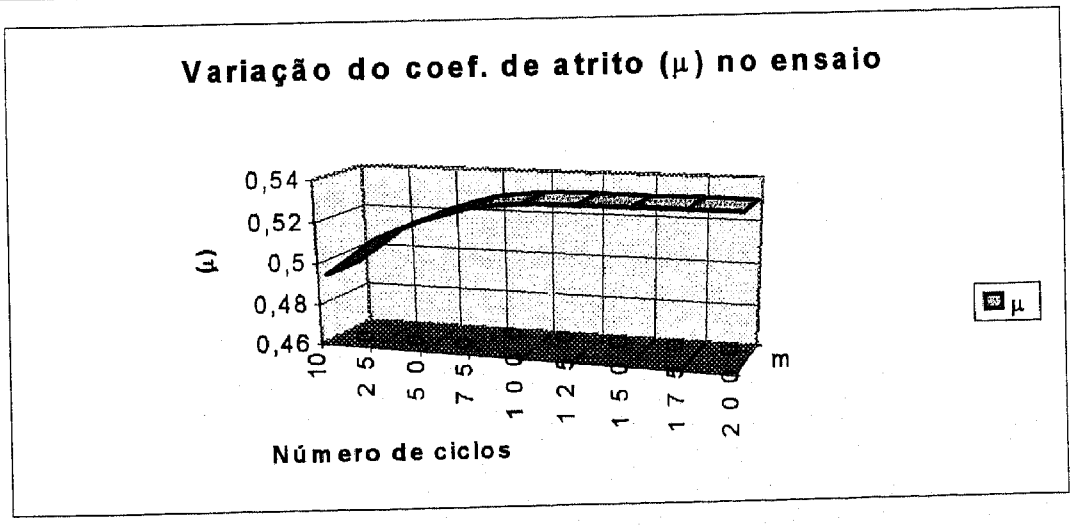
Ensaio Nº	15	
Data :	96/11/14	
Temperatura Ambiente :	16	ºC
Humidade do Ar :	81	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/2340	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	1,7	mg
Força de atrito inicial :	34,5	N

Fenómenos observados

Ligeiros sintomas de desgaste no patim , em alguns dos picos das estrias de maquinagem .
Sintomas de desgaste na pista , sob a forma de sulcos na direcção do movimento , causados por abrasão das partículas de desgaste libertadas .
Aumento do coeficiente de atrito na fase inicial do ensaio, seguida de estabilidade até ao final do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

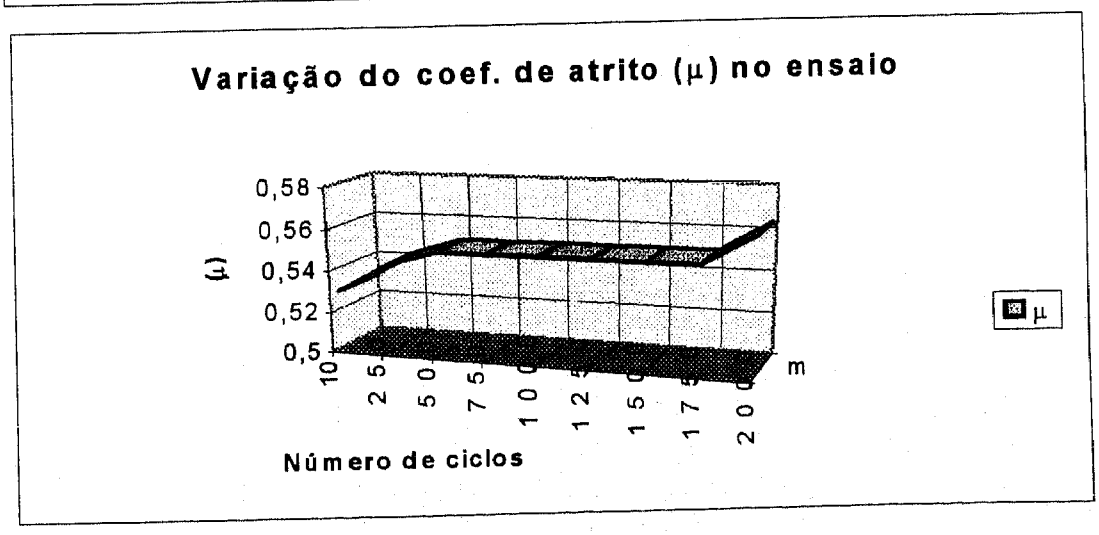
Ensaio Nº	16	
Data :	96/11/14	
Temperatura Ambiente :	18	°C
Humidade do Ar :	83	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/2340	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,1	mg
Força de atrito inicial :	37	N

Fenómenos observados

Sintomas de desgaste uniformemente distribuído por todos os picos das rugosidades do patim, sem vestígios de início de rotura do revestimento .
Verificou-se desgaste também na pista , sob a forma de sulcos na direcção do movimento , e relativos ao contacto da pista com com os picos relativos às estrias de maquinagem do patim .
Ligeiro incremento do coeficiente de atrito na fase inicial do ensaio , seguido de estabilização .
No final do ensaio verificou-se uma ligeira tendência para uma subida do coeficiente de atrito .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

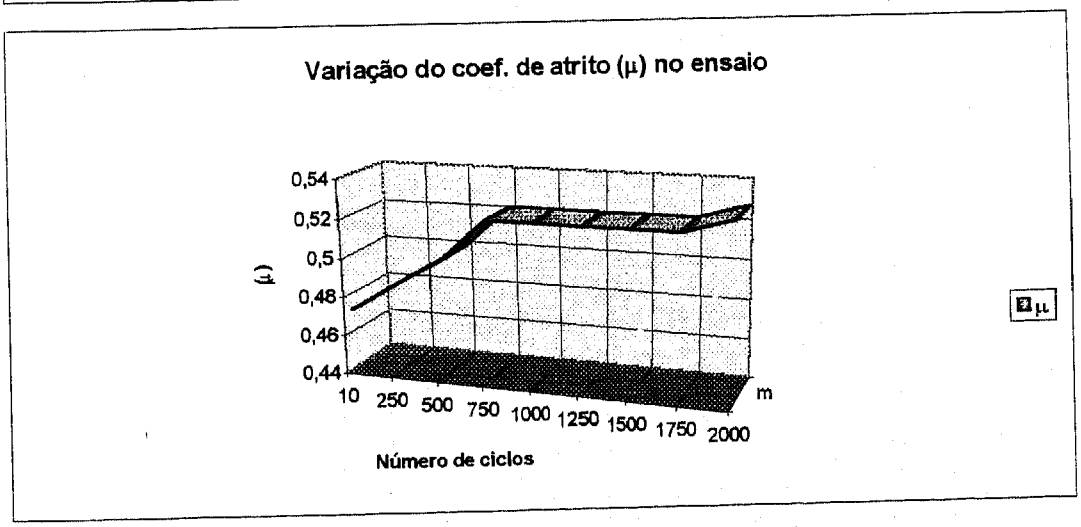
Ensaio Nº	17	
Data :	96/11/14	
Temperatura Ambiente :	18	ºC
Humidade do Ar :	82	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/2340	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,6	mg
Força de atrito inicial :	33,5	N

Fenómenos observados

Alguns sintomas de desgaste na superfície do patim , sem ter ocorrido rotura do revestimento . Foi verificado algum desgaste na superfície da pista , sob a forma de sulcos na direcção do movimento , sem contudo se ter verificado ritura do revestimento .
O coeficiente de atrito subiu desde os 100 até aos 900 ciclos , estabilizando até aos 1900 ciclos , momento em que se verificou nova tendência para o seu crescimento .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

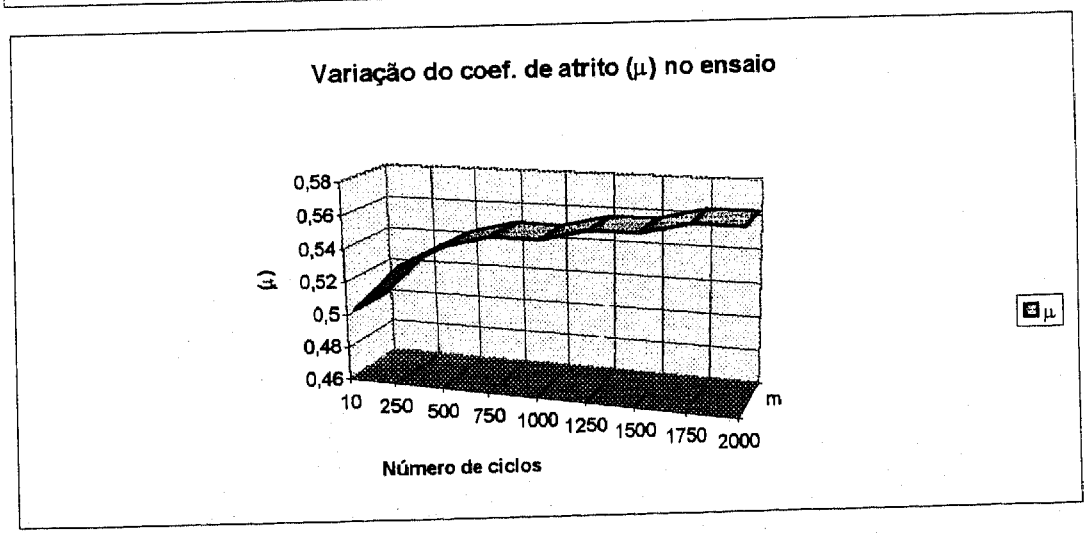
Ensaio Nº	18	
Data :	96/11/14	
Temperatura Ambiente :	18	°C
Humidade do Ar :	80	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade da Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/2340	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,9	mg
Força de atrito inicial :	35	N

Fenómenos observados

Desgaste visível no patim , com vestígios de início de rotura do revestimento , nos picos das estrias de maquinagem .
Desgaste visível na superfície da pista , através de sulcos formados pelo deslizamento dos picos das estrias de maquinagem dos patins .
O coeficiente de atrito , após um forte incremento nos primeiros 500 ciclos , teve um cresci-mento mais moderado desde os 500 ciclos até ao fim do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

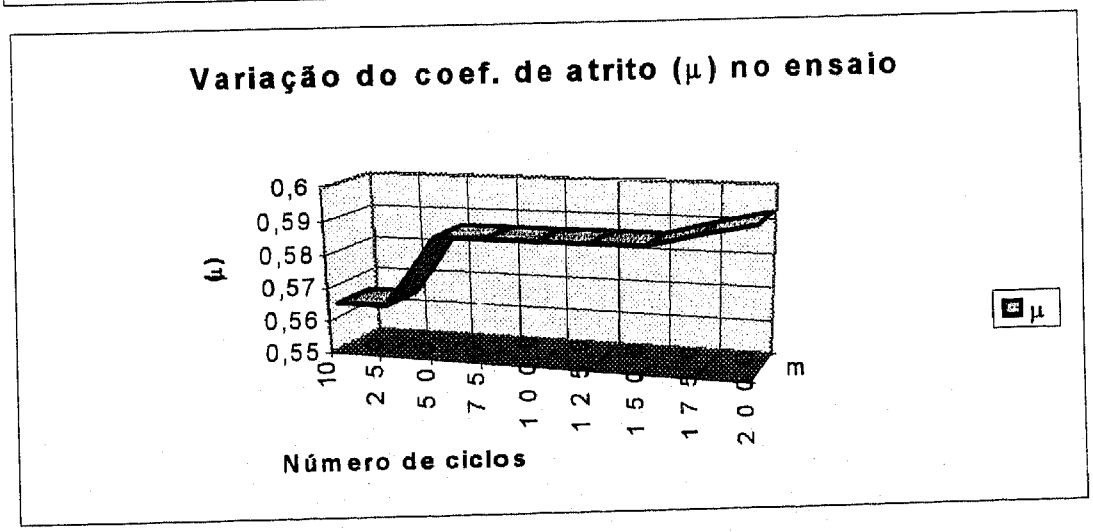
Ensaio Nº	19	
Data :	96/12/15	
Temperatura Ambiente :	20	°C
Humidade do Ar :	76	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/2340	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2	mg
Força de atrito inicial :	39,5	N

Fenómenos observados

Desgaste pouco significativo no patim , sem rotura do revestimento .
Desgaste visível na pista , através das marcas deixadas pelo deslizamento dos picos das estri-as de maquinagem do patim , sem se ter verificado no entanto rotura do revestimento da pista .
O coeficiente de atrito sofreu um primeiro incremento após a libertação das primeiras partículas de desgaste , e um novo incremento quando se deu um novo ciclo de libertação de partículas de maior dimensão .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

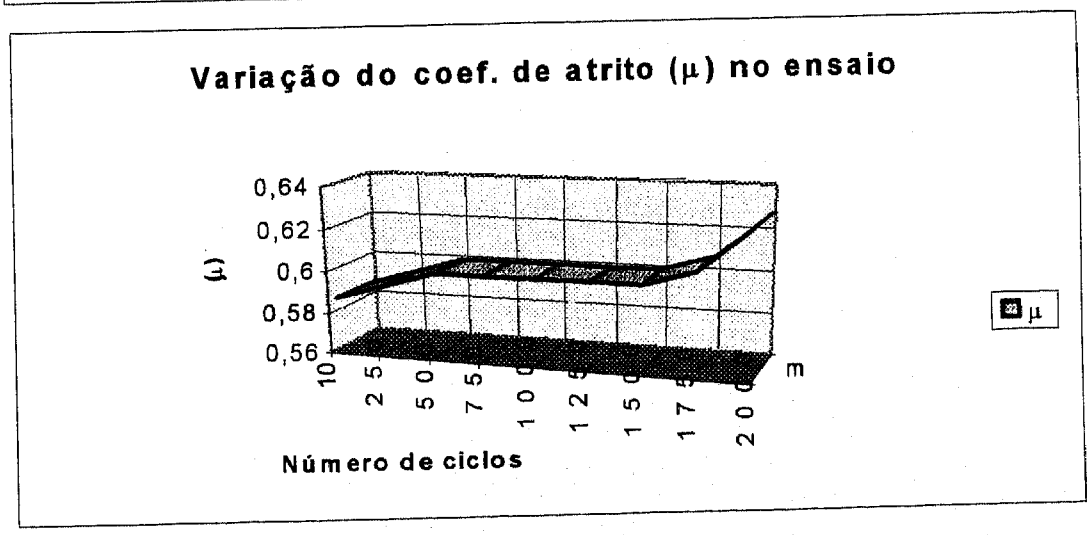
Ensaio Nº	20	
Data :	96/11/15	
Temperatura Ambiente :	20	ºC
Humidade do Ar :	76	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/2340	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,5	mg
Força de atrito inicial :	41	N

Fenómenos observados

Desgaste visível do patim , sem se ter verificado rotura do revestimento .
Desgaste significativo da pista , com rotura do revestimento segundo a direcção do movimento , devido ao deslizamento dos picos das estrias de maquinagem do patim .
Ligeiro crescimento inicial do coeficiente de atrito , devido à libertação das primeiras partículas de desgaste , seguido de estabilização . Forte incremento do coeficiente de atrito apartir dos 1800 ciclos , com o início da rotura do revestimento da pista .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

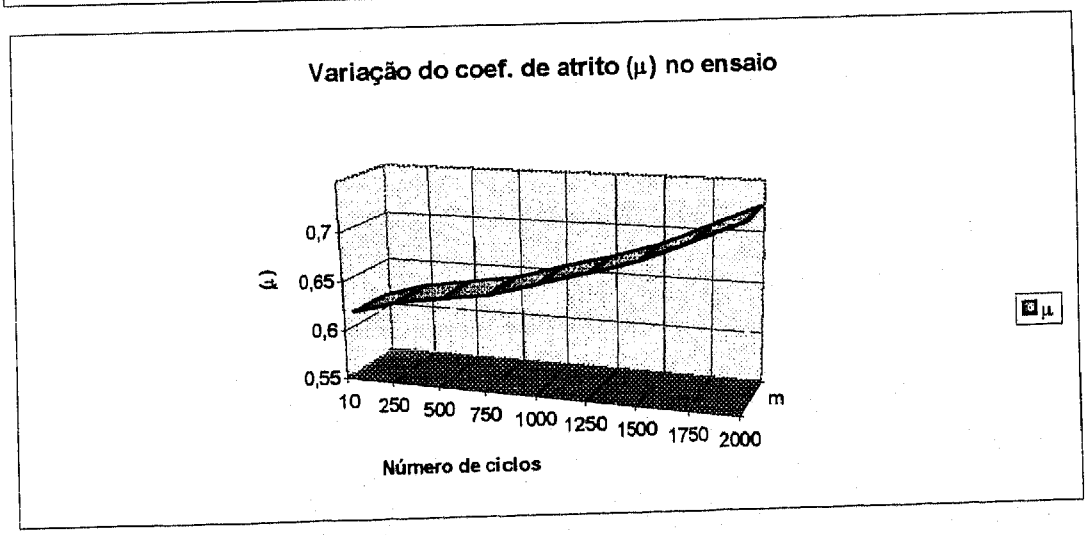
Ensaio Nº	21	
Data :	96/11/18	
Temperatura Ambiente :	16	°C
Humidade do Ar :	80	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	C220	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	5,83 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	920/2340	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	12,8	mg
Força de atrito inicial :	43	N

Fenómenos observados

Desgaste significativo do patim , com eliminação parcial dos picos das estrias de maquinagem .
Desgaste pouco significativo da pista , sem que se tivessem verificado indícios de rotura do revestimento .
O coeficiente de atrito subiu constantemente , desde o início até ao fim do ensaio .
Verificaram-se indícios mínimos de transferência do revestimento da pista para o patim , em partículas de muito pequena dimensão , e transferência de material do patim para a pista .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

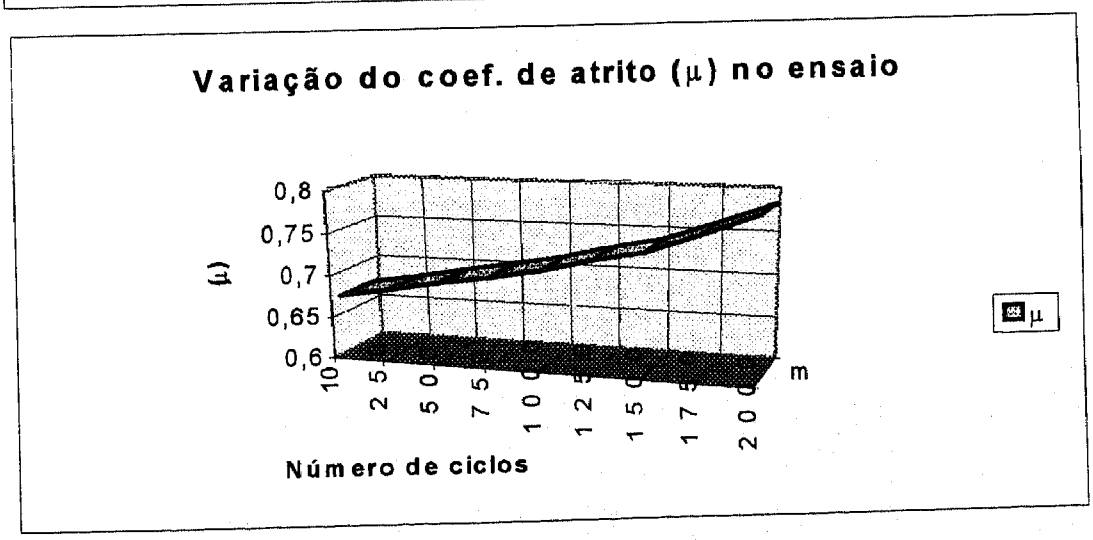
Ensaio Nº	22	
Data :	96/11/18	
Temperatura Ambiente :	17	ºC
Humidade do Ar :	80	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	C220	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	5,83 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	920/2340	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	15	mg
Força de atrito inicial :	47	N

Fenómenos observados

Desgaste intenso do patim , com destrição dos picos das estrias de maquinagem .
Desgaste visível da pista , sem rotura do revestimento , notando-se uma camada de partículas de desgaste provenientes do patim na superfície da pista .
O coeficiente de atrito aumentou práticamente de forma constante durante todo o ensaio .
Verificou-se transferência de material de forma significativa do patim para a pista , e ligeiras inclusões de revestimento da pista no patim .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

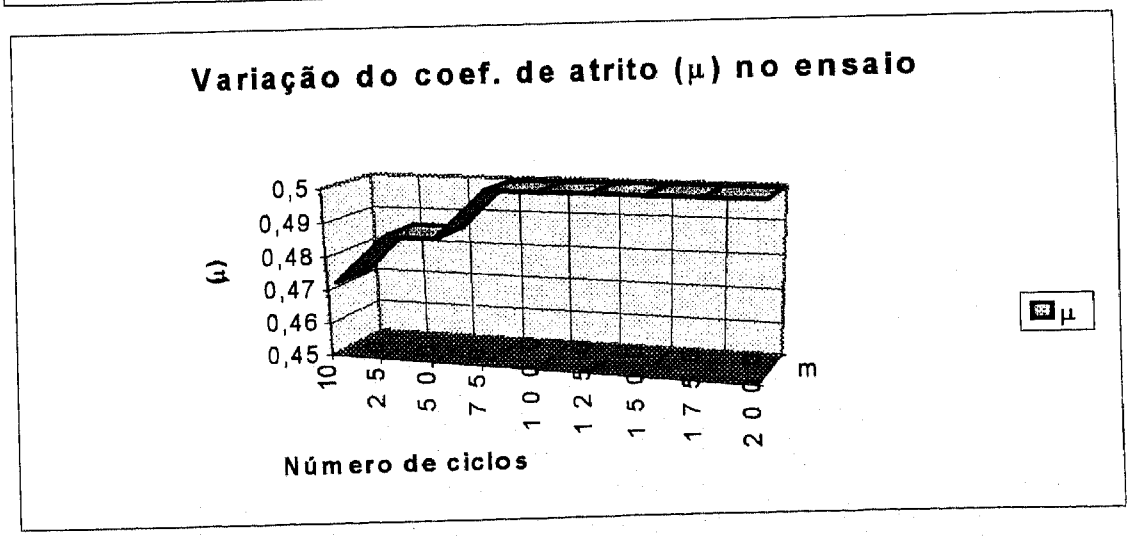
Ensaio Nº	23	
Data :	96/11/18	
Temperatura Ambiente :	17	°C
Humidade do Ar :	80	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/2080	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	1,6	mg
Força de atrito inicial :	33	N

Fenómenos observados

Ligeiro desgaste do patim , sem qualquer indício de rotura do revestimento .
Marcas de sulcos deixados pelo deslizamento dos picos das estrias de maquinagem do patim na superfície da pista , sem rotura do revestimento .
O coeficiente de atrito teve dois ligeiros incrementos , aos 150 e 550 ciclos , devido a libertação de partículas extremamente pequenas .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

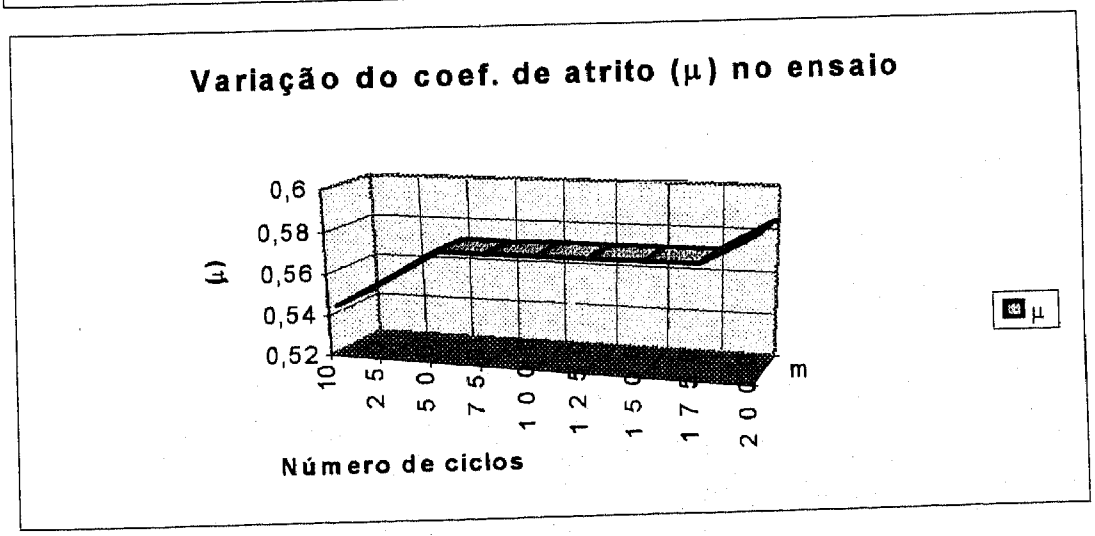
Ensaio Nº	24	
Data :	96/11/18	
Temperatura Ambiente :	19	°C
Humidade do Ar :	78	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/2080	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,1	mg
Força de atrito inicial :	38	N

Fenómenos observados

Desgaste visível do patim , sem vestígios de rotura do revestimento nos picos das rugosidades .
Desgaste da pista , sob a forma de sulcos causados pelo deslizamento dos picos das estrias de maquinagem do patim , com indícios de rotura localizada do revestimento da pista .
O coeficiente de atrito , após um ligeiro crescimento inicial , correspondente às primeiras partículas muito pequenas de desgaste que se libertaram , estabilizou , voltando a sofrer novo incremento apartir dos 1900 ciclos , quando da libertação de partículas de maior dimensão .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

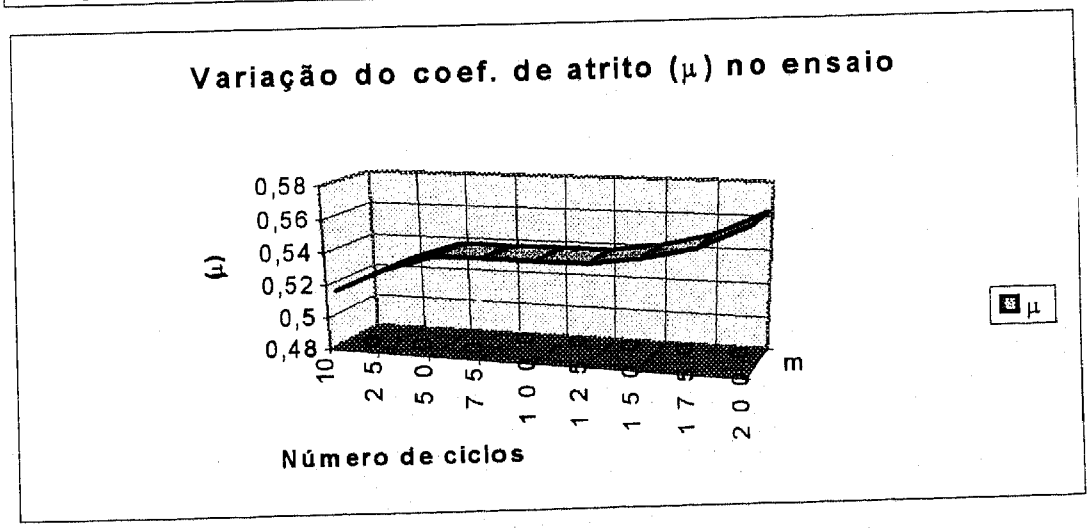
Ensaio Nº	25	
Data :	96/11/18	
Temperatura Ambiente :	19	°C
Humidade do Ar :	78	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/2080	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	3	mg
Força de atrito inicial :	36	N

Fenómenos observados

Desgaste evidente dos picos das rugosidades do patim , com início de rotura quase generaliza-da do revestimento nos picos .
Sintomas de desgaste na pista , sob a forma de sulcos provocados por partículas de desgaste libertadas .
Coeficiente de atrito crescente na fase inicial e final do ensaio , devido à libertação de partículas de desgaste , estabilização , e posterior incremento na fase de início da rotura do revestimento.



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

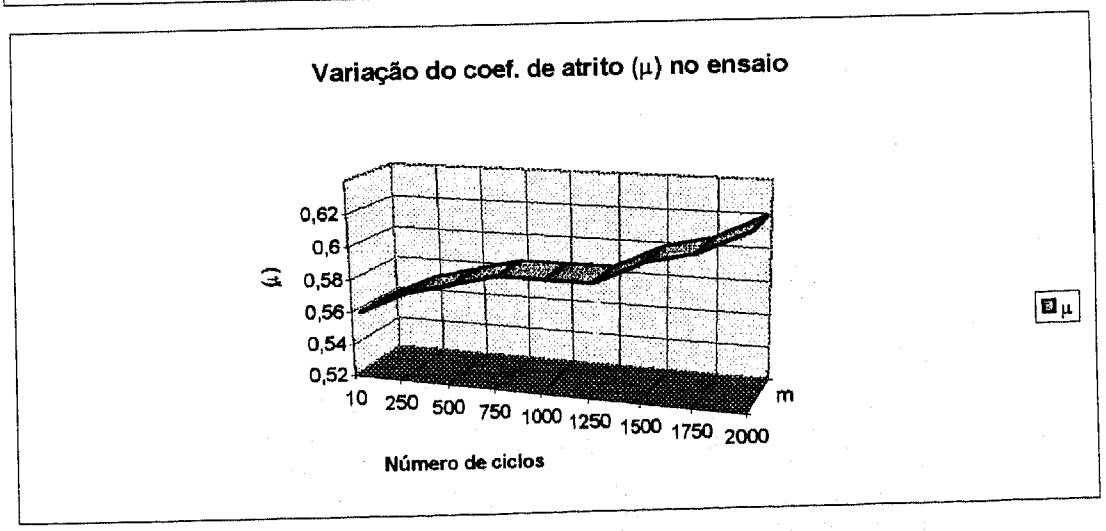
Ensaio Nº	26	
Data :	96/11/19	
Temperatura Ambiente :	16	°C
Humidade do Ar :	81	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/2080	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	3,5	mg
Força de atrito inicial :	39	N

Fenómenos observados

Desgaste pronunciado do patim , com rotura quase generalizada dos picos das rugosidades . Desgaste visível na pista , sob a forma de sulcos provocados por abrasão devida à libertação e movimentação de partículas de desgaste no contacto ,sem que tenha ocorrido rotura do revestimento .A força de atrito subiu numa fase inicial, vindo a estabilizar apartir dos 700 ciclos . Aos 1200 ciclos começou a verificar-se a rotura do revestimento do patim , causando um forte incremento no coeficiente de atrito até ao fim do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

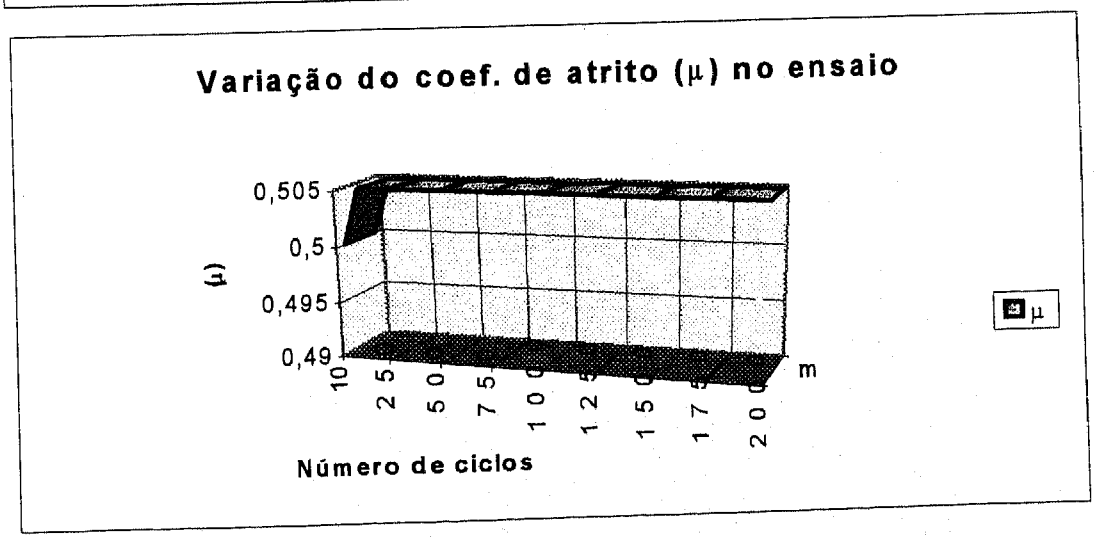
Ensaio Nº	27	
Data :	96/11/19	
Temperatura Ambiente :	16	ºC
Humidade do Ar :	82	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/2080	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	1,9	mg
Força de atrito inicial :	35	N

Fenómenos observados

Ligeiro desgaste dos picos das rugosidades do patim , sem indícios de rotura do revestimento.
Ligeiro desgaste da superfície da pista , com marcas pouco significativas do deslizamento dos picos das rugosidades do patim . Não se verificou qualquer sinal de rotura do revestimento da pista .
O coeficiente de atrito , após um muito ligeiro incremento inicial , mante-se constante ao longo de todo o ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

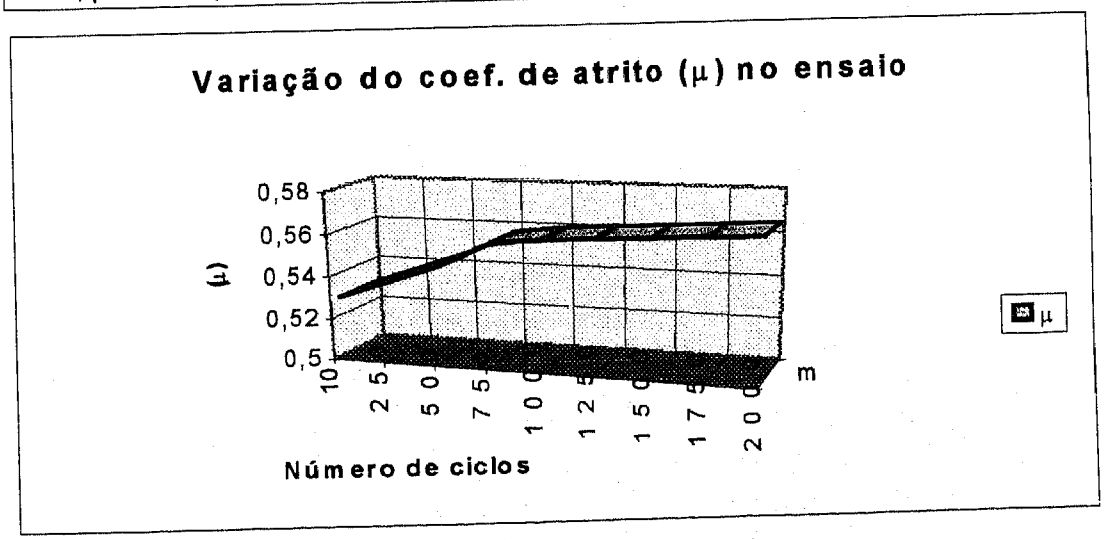
Ensaio Nº	28	
Data :	96/11/19	
Temperatura Ambiente :	17	ºC
Humidade do Ar :	80	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/2080	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,4	mg
Força de atrito inicial :	37	N

Fenómenos observados

Desgaste perceptível no patim , distribuído de forma uniforme por todos os picos de rugosidades correspondentes às estrias de maquinagem do patim .
Desgaste visível na superfície da pista , sob a forma de sulcos na direcção do movimento , sem que se verificasse rotura do revestimento da pista .
Coeficiente de atrito bastante estável , com um incremento mais acentuado entre os 700 e 850 ciclos , provocado pela libertação de pequenas partículas de desgaste .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

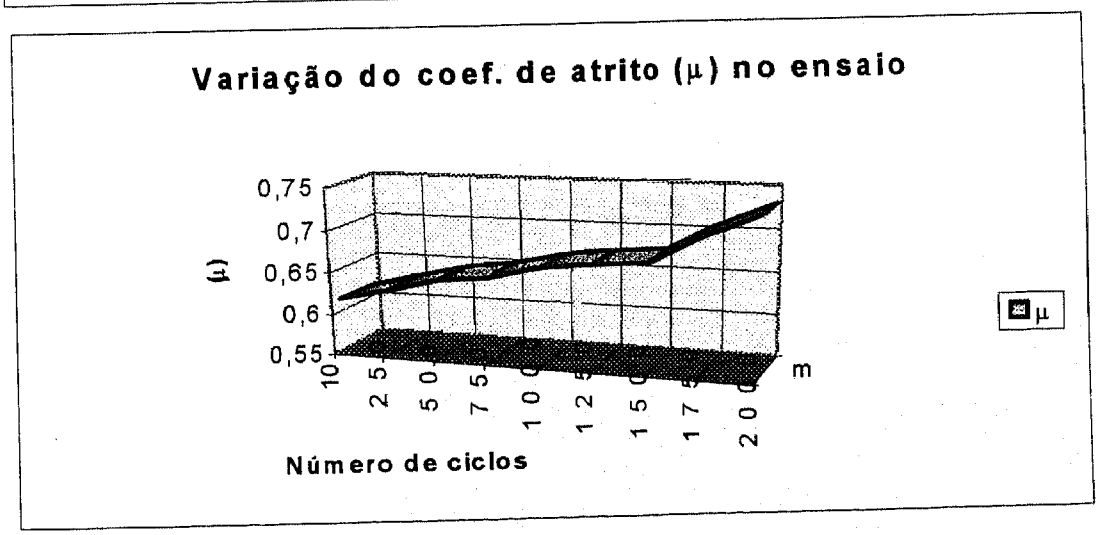
Ensaio Nº	29	
Data :	96/11/20	
Temperatura Ambiente :	16	ºC
Humidade do Ar :	79	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	C220	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	5,83 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	920/2080	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	11,8	mg
Força de atrito inicial :	43	N

Fenómenos observados

Desgaste muito significativo no patim , com remoção parcial dos picos das rugosidades das estrias de maquinagem .Não foi observada transferência de material da pista para o patim .
Desgaste pouco significativo do revestimento da pista , com marcas nítidas de transferência de material do patim para a pista .
O coeficiente de atrito subiu durante todo o ensaio , e de uma forma ainda mais significativa após os 1800 ciclos , quando as partículas de desgaste atingiram maiores dimensões .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

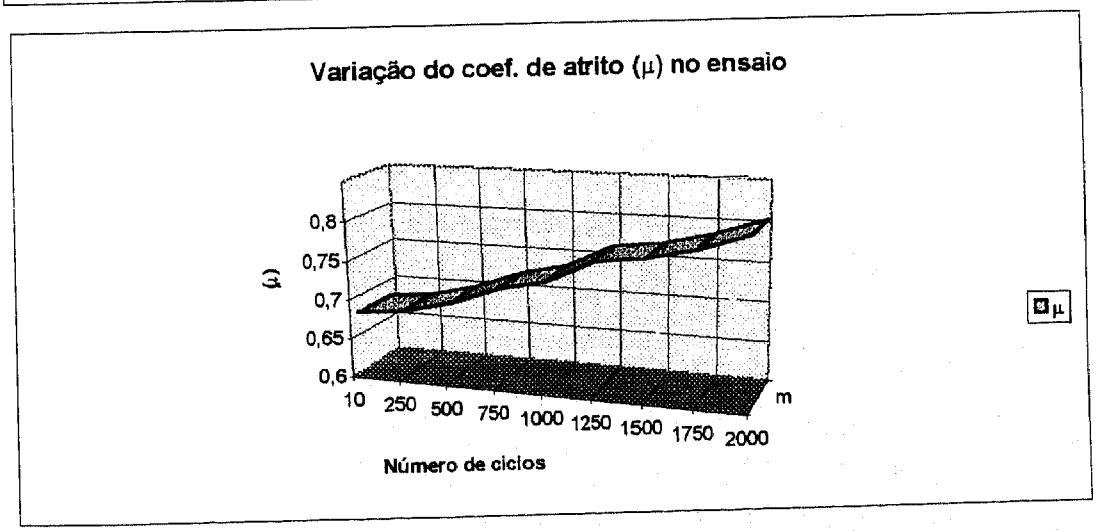
Ensaio Nº	30	
Data :	96/11/20	
Temperatura Ambiente :	17	°C
Humidade do Ar :	79	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	C220	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	5,83 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	920/2080	HV
Tipo de contacto :	Seco	
Tipo de lubrificante :		

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	13,4	mg
Força de atrito inicial :	47,5	N

Fenómenos observados

Desgaste muito significativo do patim , com eliminação quase total das estrias de maquinagem. Desgaste visível na superfície da pista , sob a forma de sulcos , mas sem rotura do revestimento . Tornou-se perfeitamente visível a transferência de material do patim para a pista , sob a forma de pequenas partículas de desgaste .
O coeficiente de atrito subiu durante todo o ensaio , e de forma mais significativa na fase final do ensaio , devido ao tamanho e quantidade de partículas de desgaste libertadas .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

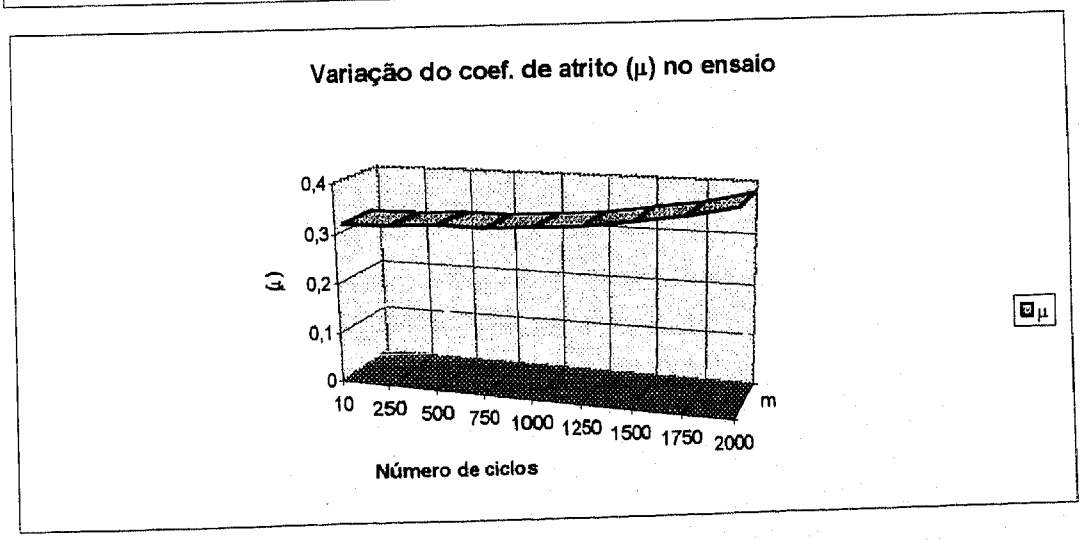
Ensaio Nº	31	
Data :	96/11/22	
Temperatura Ambiente :	19	°C
Humidade do Ar :	74	%
Superfície da Pista :	C220	
Superfície do Patim :	TIN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,663	μm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/920	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,4	mg
Força de atrito inicial :	22	N

Fenómenos observados

Desgaste do patim mínimo . A superfície apresentava um aspecto após ensaio muito idêntico ao seu aspecto inicial .
A pista apresentava marcas de desgaste orientadas segundo a direcção do movimento , e nos pontos de contacto e deslizamento com os picos do patim .
O coeficiente de atrito subiu moderadamento durante todo o ensaio .
Foi notada a presença de pequenas partículas no lubrificante , após a realização do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

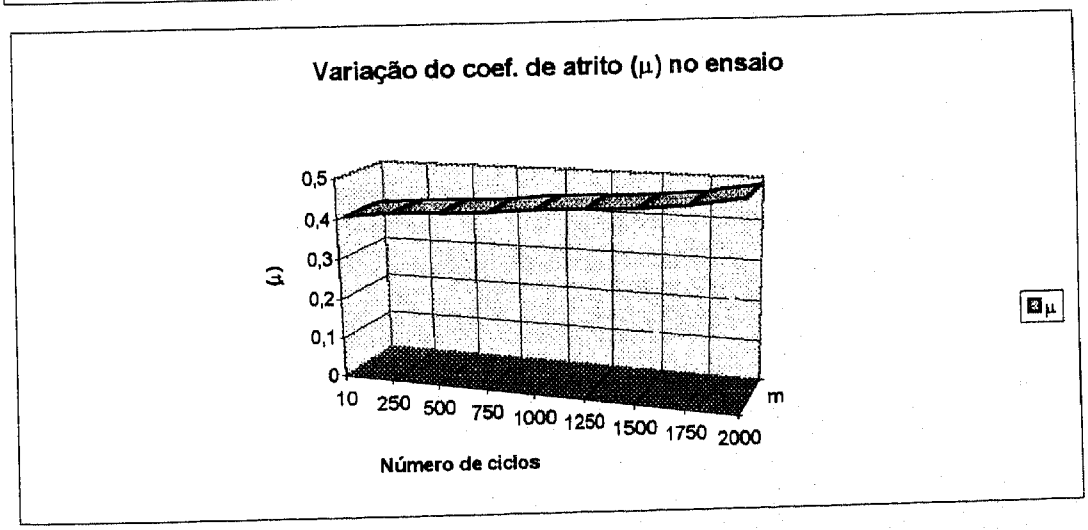
Ensaio Nº	32	
Data :	96/11/23	
Temperatura Ambiente :	18	ºC
Humidade do Ar :	76	%
Superfície da Pista :	C220	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/920	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,5	mg
Força de atrito inicial :	28	N

Fenómenos observados

A superfície do patim apresentava um aspecto após ensaio práticamente idêntico ao seu aspec-to inicial , isto é , sem sinais evidentes de desgaste .
A pista apresentou ligeiros sinais de desgaste , sob a forma de sulcos provocados pelo deslizamento dos picos das estrias de maquinagem do patim .
O coeficiente de atrito subiu moderadamento ao longo de todo o ensaio . Foi registada a presença de um maior número de partículas de desgaste no lubrificante , após o ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

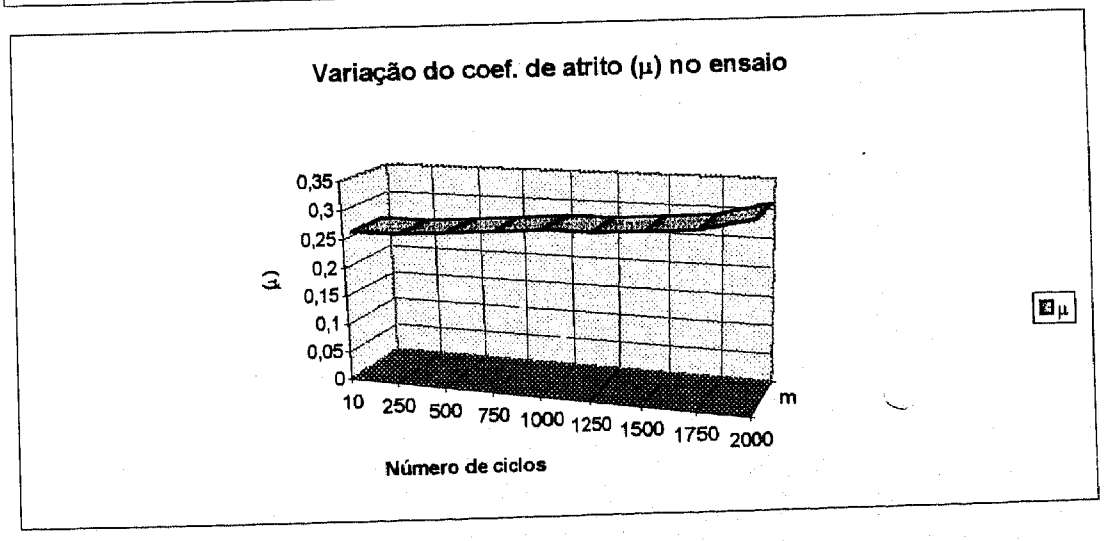
Ensaio Nº	33	
Data :	96/11/22	
Temperatura Ambiente :	18	°C
Humidade do Ar :	75	%
Superfície da Pista :	C220	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/920	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,7	mg
Força de atrito inicial :	18	N

Fenómenos observados

Sintomas muito ligeiros de desgaste na superfície do patim , apenas em alguns dos seus picos.
Sintomas de desgaste ligeiro da superfície da pista sob a forma de sulcos .
O coeficiente de atrito subiu muito ligeiramente ao longo de todo o ensaio , tendo-se verificado um incremento mais acentuado nos últimos 100 ciclos do ensaio .
Registaram-se a presença de partículas de desgaste no lubrificante , após o ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

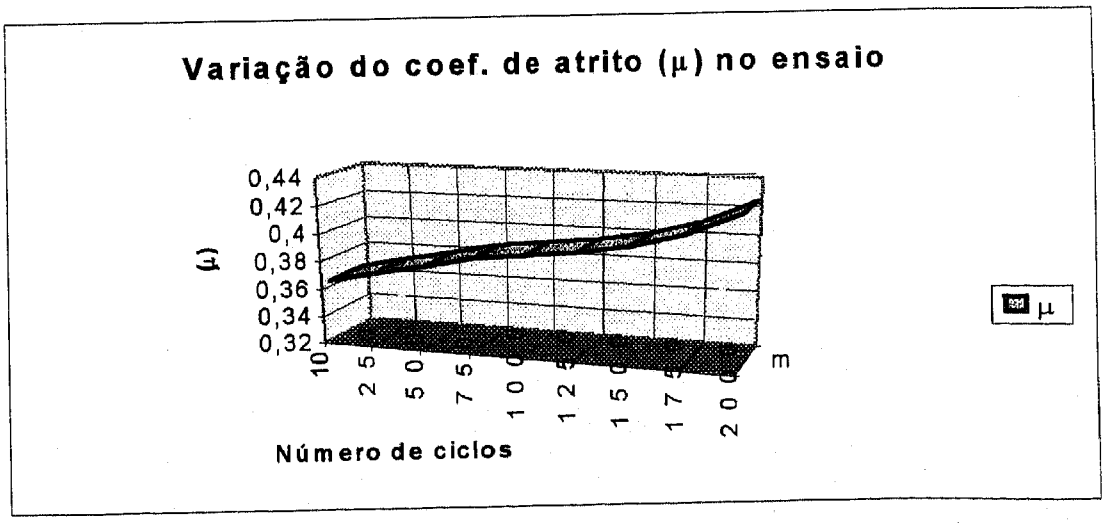
Ensaio Nº	34	
Data :	96/11/22	
Temperatura Ambiente :	18	ºC
Humidade do Ar :	75	%
Superfície da Pista :	C220	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/920	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,9	mg
Força de atrito inicial :	25,5	N

Fenómenos observados

Ligeiro desgaste da superfície do patim , distribuído uniformemente por todos os seus picos .
Ligeiro desgaste da pista , sob a forma de sulcos na direcção do movimento .
O coeficiente de atrito aumentou muito ligeiramente durante todo o ensaio , e de uma forma mais significativa nos últimos 200 ciclos do ensaio .
Foi registada a presença de partículas de desgaste no lubrificante , provenientes principalmente da superfície da pista .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

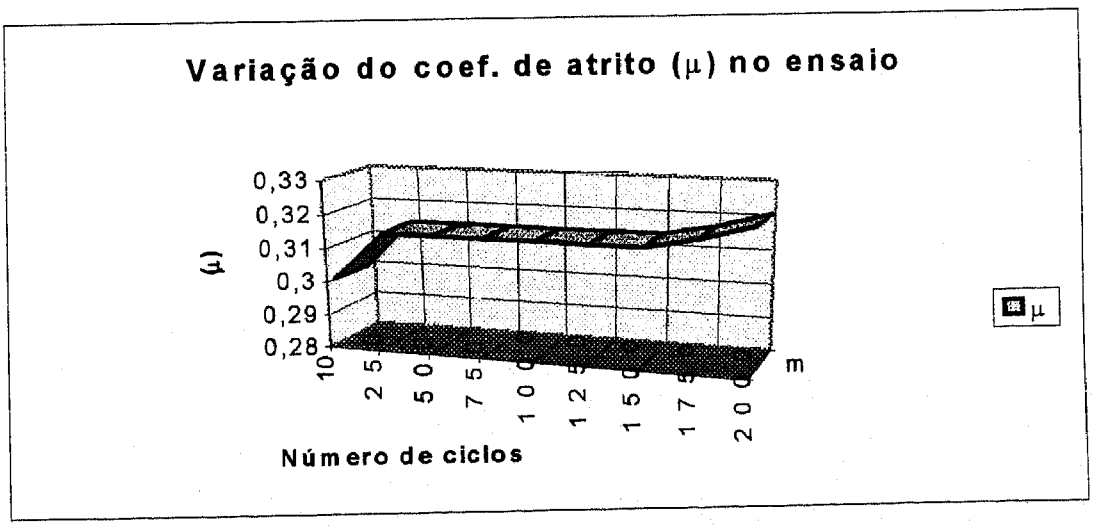
Ensaio Nº	35	
Data :	96/11/25	
Temperatura Ambiente :	15	ºC
Humidade do Ar :	82	%
Superfície da Pista :	C220	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,663	µm
Dureza superficial do Paim / Pista :	2080/920	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,5	mg
Força de atrito inicial :	21	N

Fenómenos observados

Foi observado um desgaste mínimo na superfície do patim , que conservava um aspecto muito idêntico ao observado antes do ensaio .
A pista apresentou ligeiros sintomas de desgaste , sob a forma de ligeiros sulcos distribuídos segundo a direcção do movimento , e correspondendo ao deslizamento dos picos do patim .
O coeficiente de atrito manteve-se bastante estável quase durante todo o ensaio , registando-se apenas um ligeiro incremento nos 250 ciclos iniciais , e nos últimos 350 ciclos .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

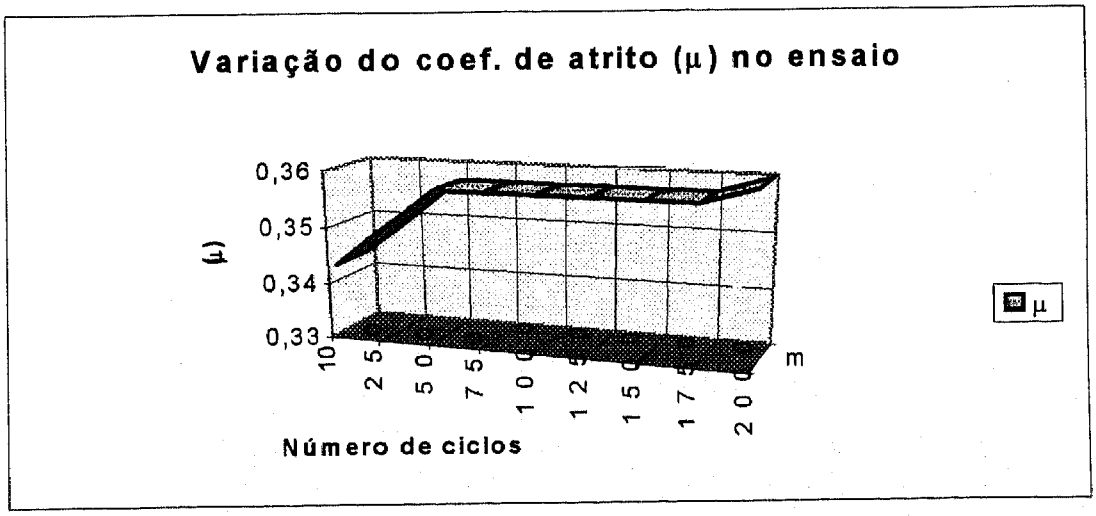
Ensaio N°	36	
Data :	96/11/25	
Temperatura Ambiente :	17	°C
Humidade do Ar :	82	%
Superfície da Pista :	C220	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
N° de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/920	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,7	mg
Força de atrito inicial :	24	N

Fenómenos observados

O patim apresentou um desgaste muito reduzido , sendo o aspecto da superfície no final do ensaio muito idêntico ao inicial .
A pista apresentou sintomas de desgaste , sob a forma de sulcos correspondentes ao deslizamento dos picos do patim .
O coeficiente de atrito , após um ligeiro aumento inicial ,estabilizou , voltando a aumentar na fase final do ensaio , devido à maior libertação de partículas de desgaste pela superfície da pista.



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

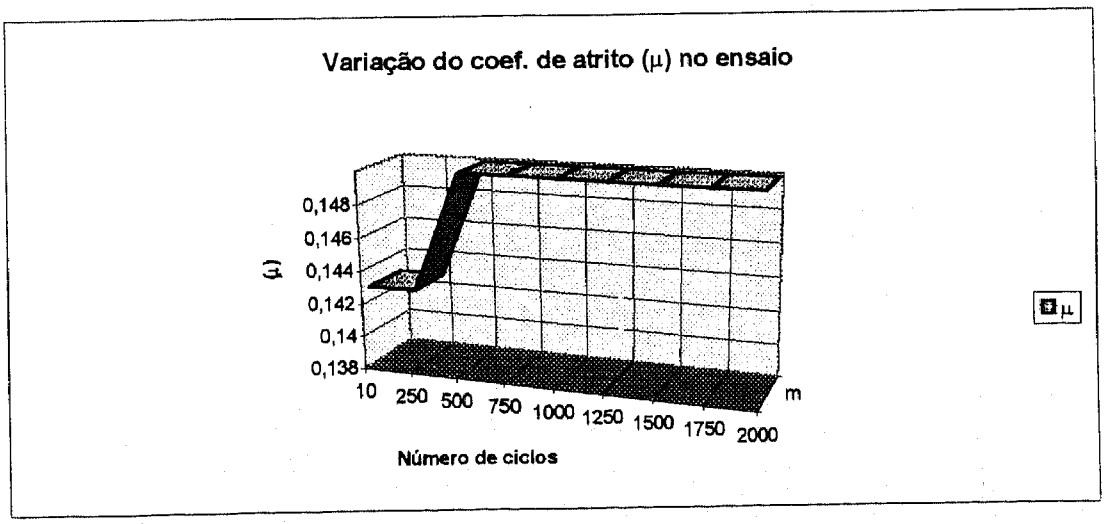
Ensaio Nº	37	
Data :	96/11/26	
Temperatura Ambiente :	16	°C
Humidade do Ar :	80	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/1960	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,6	mg
Força de atrito inicial :	10	N

Fenómenos observados

O patim apresentou sintomas muito ligeiros de desgaste no topo dos seus picos .
A pista apresentou marcas muito ligeiras do contacto de deslizamento com os picos do patim .
O coeficiente de atrito , após um ligeiro incremento inicial , manteve-se estável até ao final do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

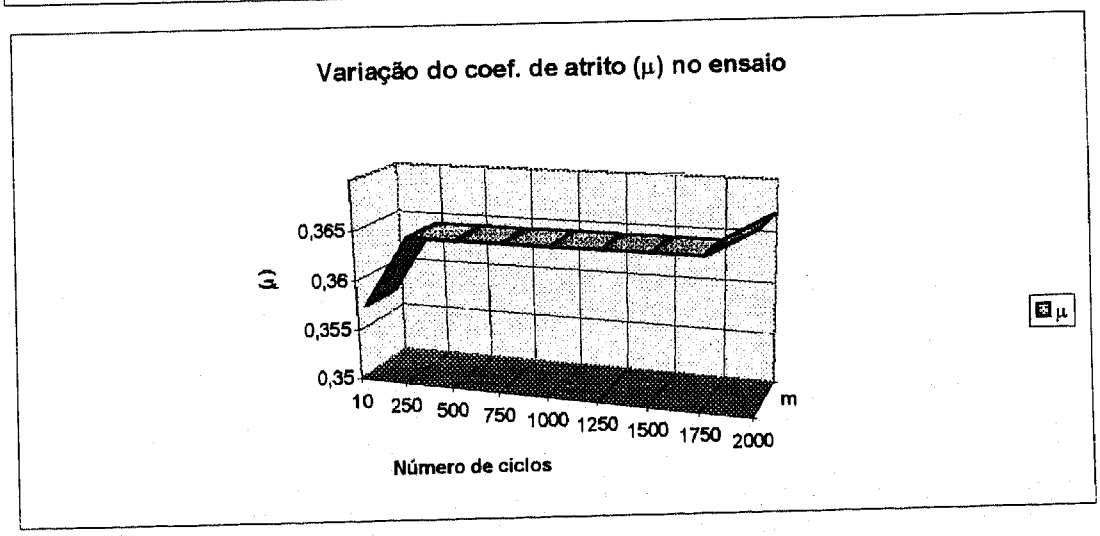
Ensaio Nº	38	
Data :	96/11/26	
Temperatura Ambiente :	17	ºC
Humidade do Ar :	80	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/1960	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,9	mg
Força de atrito inicial :	25	N

Fenómenos observados

Desgaste praticamente insignificante da superfície do patim .
Ligeiras marcas de desgaste na pista , provocadas pelo deslizamento dos picos do patim sobre a sua superfície .
O coeficiente de atrito , após um ligeiro incremento inicial , estabilizou , voltando a mostrar tendência para subir na fase final do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

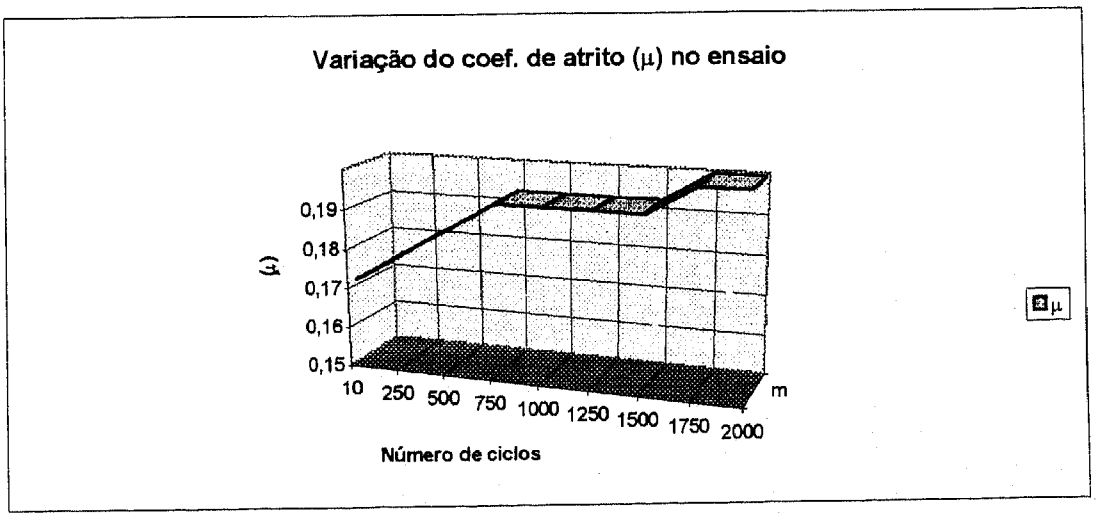
Ensaio Nº	39	
Data :	96/11/26	
Temperatura Ambiente :	18	°C
Humidade do Ar :	80	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/1960	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,9	mg
Força de atrito inicial :	12	N

Fenómenos observados

Desgaste muito pouco significativo do patim , apresentando um aspecto após o ensaio muito idêntico ao aspecto inicial .
Desgaste da pista quase imperceptível .
O coeficiente de atrito subiu ligeiramente na primeira fase do ensaio ,estabilizando de seguida até aos 1600 ciclos , momento em que registou uma nova subida muito ligeira , devida a liberta-ção de algumas partículas de desgaste , fixando-se neste novo valor até final do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

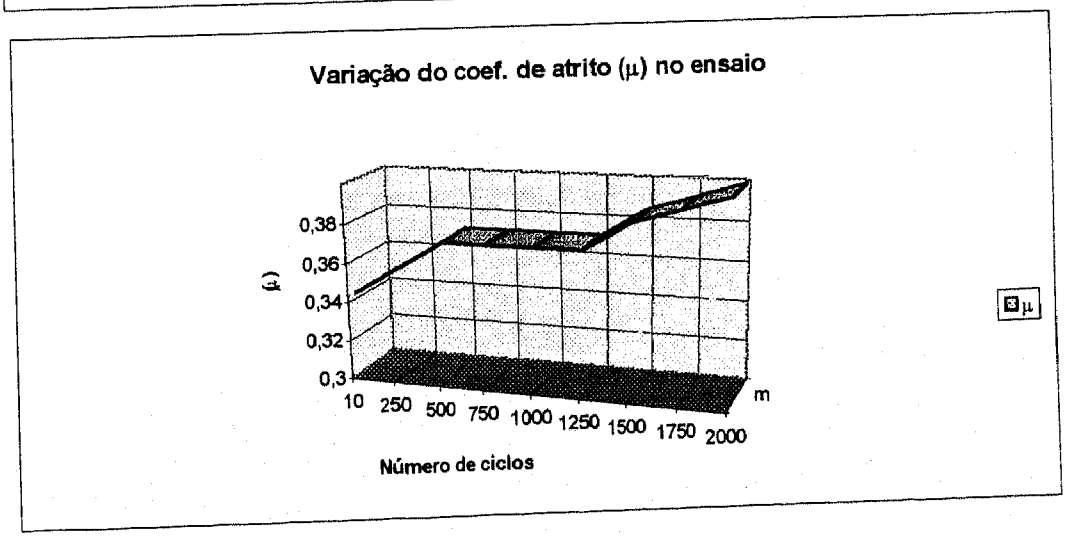
Ensaio Nº	40	
Data :	96/11/26	
Temperatura Ambiente :	18	°C
Humidade do Ar :	80	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/1960	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	1,3	mg
Força de atrito inicial :	24	N

Fenómenos observados

Sintomas de desgaste ligeiro nos picos das rugosidades do patim .
Ligeiro desgaste da superfície da pista, sem contudo apresentar marcas evidentes de desgaste.
O coeficiente de atrito subiu na fase inicial e final do ensaio , como consequência da libertação de partículas de desgaste muito pequenas .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

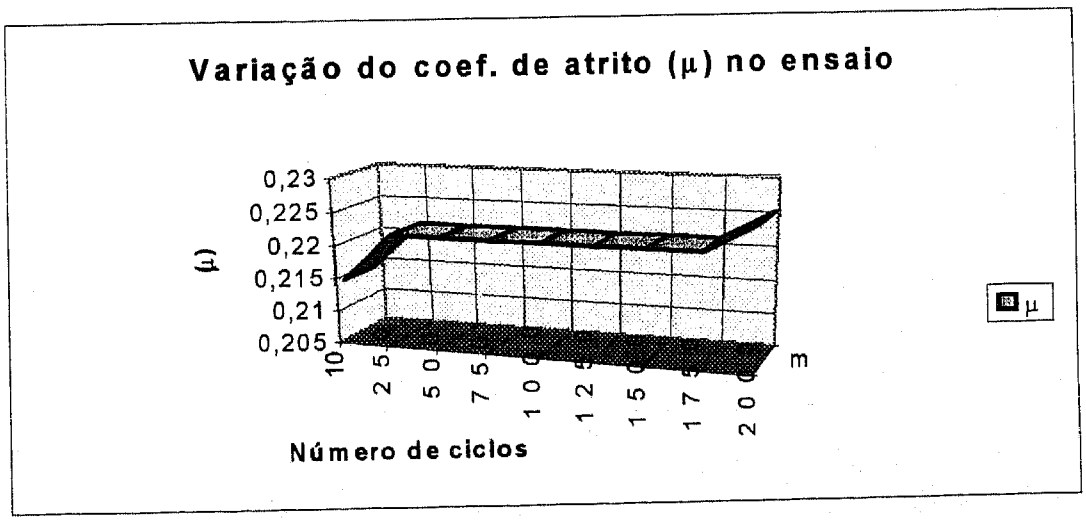
Ensaio Nº	41	
Data :	96/11/27	
Temperatura Ambiente :	15	°C
Humidade do Ar :	83	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/1960	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,6	mg
Força de atrito inicial :	15	N

Fenómenos observados

Desgaste do patim praticamente imperceptível .
A pista apresentou um aspecto após ensaio muito idêntico ao aspecto inicial , quase isenta de marcas de desgaste .
O coeficiente de atrito registou um incremento do seu valor na fase inicial do ensaio , estabilizando de seguida quase até ao seu termo . Nos últimos 50 ciclos verificou-se um ligeiro aumento , mas pouco significativo .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

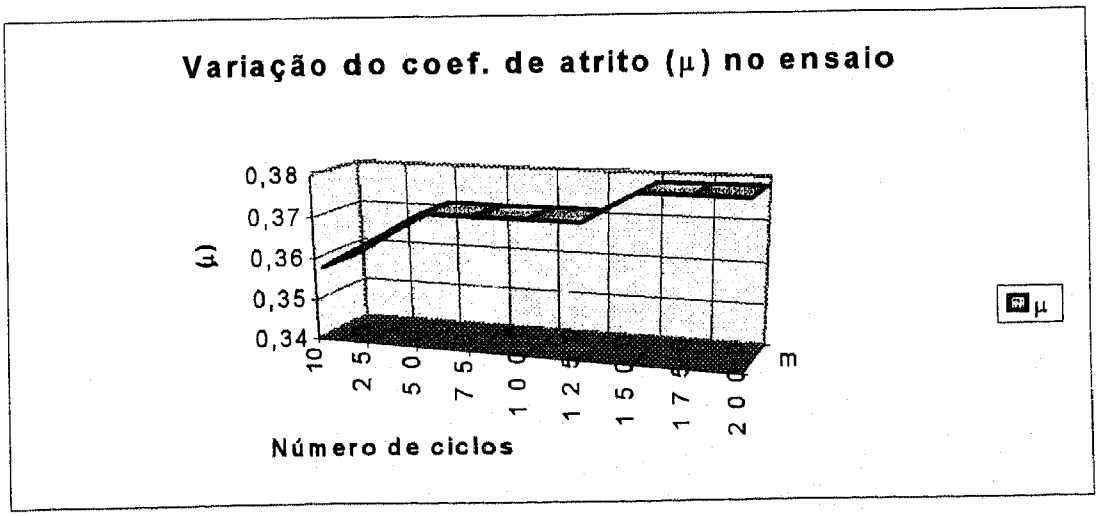
Ensaio Nº	42	
Data :	96/11/27	
Temperatura Ambiente :	15	ºC
Humidade do Ar :	83	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/1960	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,9	mg
Força de atrito inicial :	25	N

Fenómenos observados

O patim registou um desgaste mínimo .
A pista apresentou sinais de desgaste pouco relevantes .
O coeficiente de atrito registou fases em que se verificou uma ligeira subida do seu valor .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

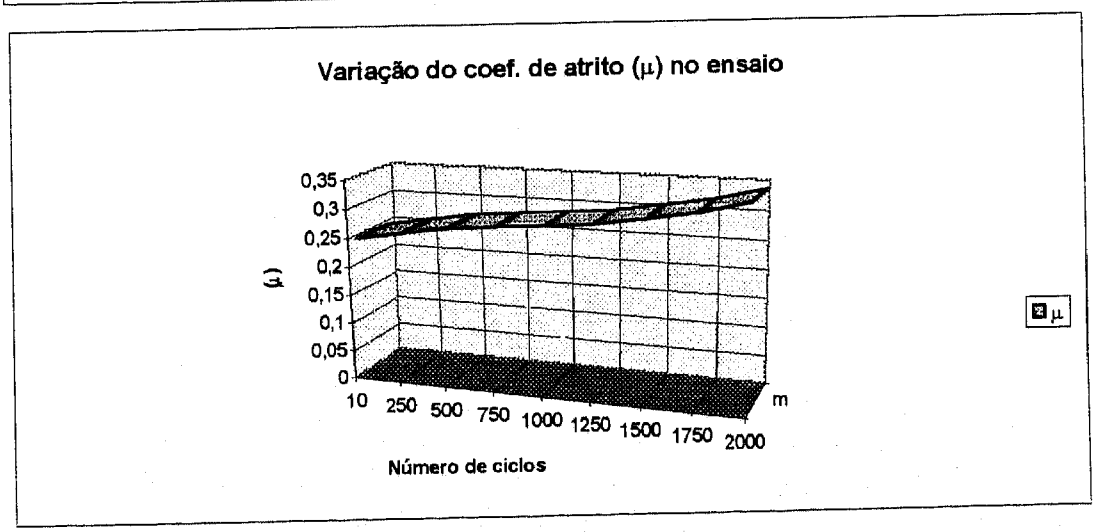
Ensaio Nº	43	
Data :	96/11/27	
Temperatura Ambiente :	16	ºC
Humidade do Ar :	82	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	C220	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	5,83 / 0,663	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	920/1960	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,2	mg
Força de atrito inicial :	17	N

Fenómenos observados

Verificou-se um desgaste evidente do patim , com remoção parcial dos picos das rugosidades da sua superfície .
A pista sofreu apenas um ligeiro desgaste , sob a forma de sulcos de profundidade mínima .
O coeficiente de atrito subiu de forma consistente durante todo o ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

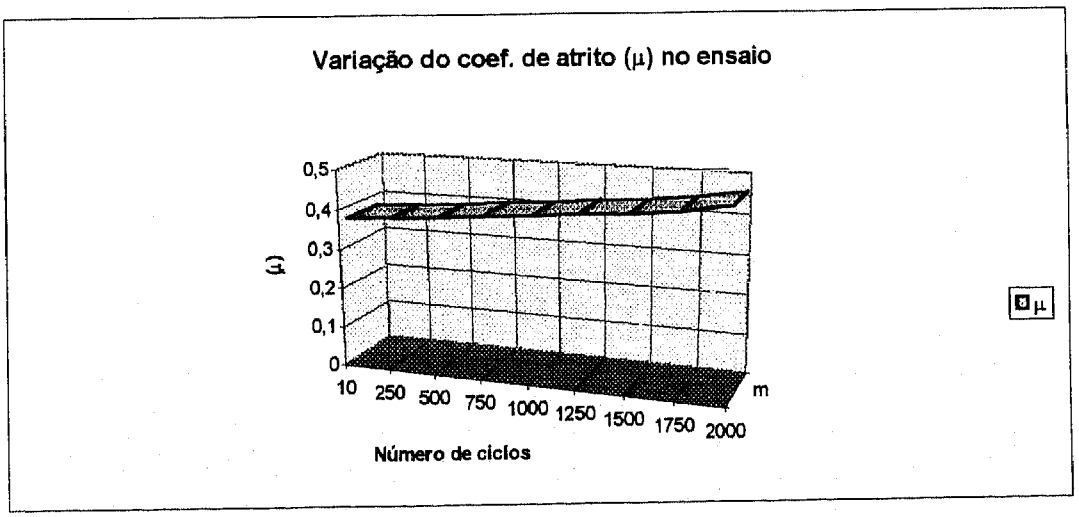
Ensaio Nº	44	
Data :	96/11/27	
Temperatura Ambiente :	16	ºC
Humidade do Ar :	81	%
Superfície da Pista :	TiN	
Superfície do Patim :	C220	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	5,83 / 0,663	μm
Dureza superficial do Patim / Pista :	920/1960	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	3,4	mg
Força de atrito inicial :	26	N

Fenómenos observados

O patim apresentou marcas bem evidentes de desgaste , através da remoção parcial dos picos das suas rugosidades .
A pista apresentou algumas marcas de desgaste, sob a forma de sulcos de baixa profundidade.
O coeficiente de atrito subiu de forma consistente durante todo o ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

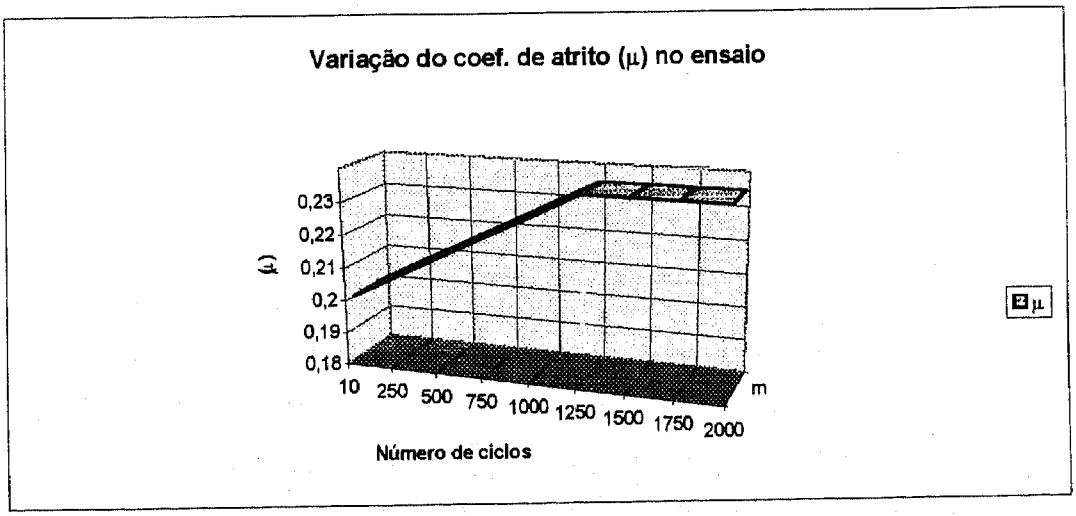
Ensaio Nº	45	
Data :	96/11/27	
Temperatura Ambiente :	18	ºC
Humidade do Ar :	78	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/2340	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,4	mg
Força de atrito inicial :	14	N

Fenómenos observados

Ligeiros sintomas de desgaste nos picos das rugosidades do patim .
A pista apresentou marcas do contacto com as rugosidades do patim , sob a forma de sulcos de relativamente baixa profundidade .
O coeficiente de atrito cresceu de forma consistente durante grande parte do ensaio , vindo posteriormente a estabilizar .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

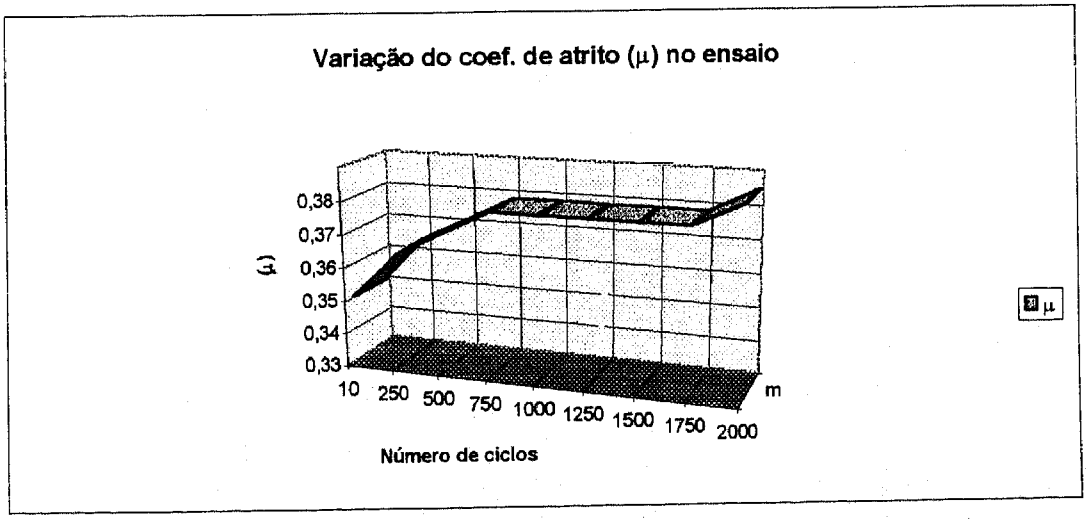
Ensaio N°	46	
Data :	96/11/27	
Temperatura Ambiente :	18	°C
Humidade do Ar :	78	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	TiN	
N° de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,733	μm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/2340	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,7	mg
Força de atrito inicial :	24,5	N

Fenómenos observados

O patim apresentou alguns sintomas ligeiros de desgaste nos picos das suas rugosidades .
A pista apresentou sulcos provenientes do contacto com o patim .
O coeficiente de atrito registou ums subida mais acentuada na fase inicial , vindo a estabilizar ao longo do ensaio . Nos últimos 100 ciclos do ensaio , registou-se um novo aumento do coefi-ciente de atrito , devido à libertação de partículas de desgaste de maior dimensão .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

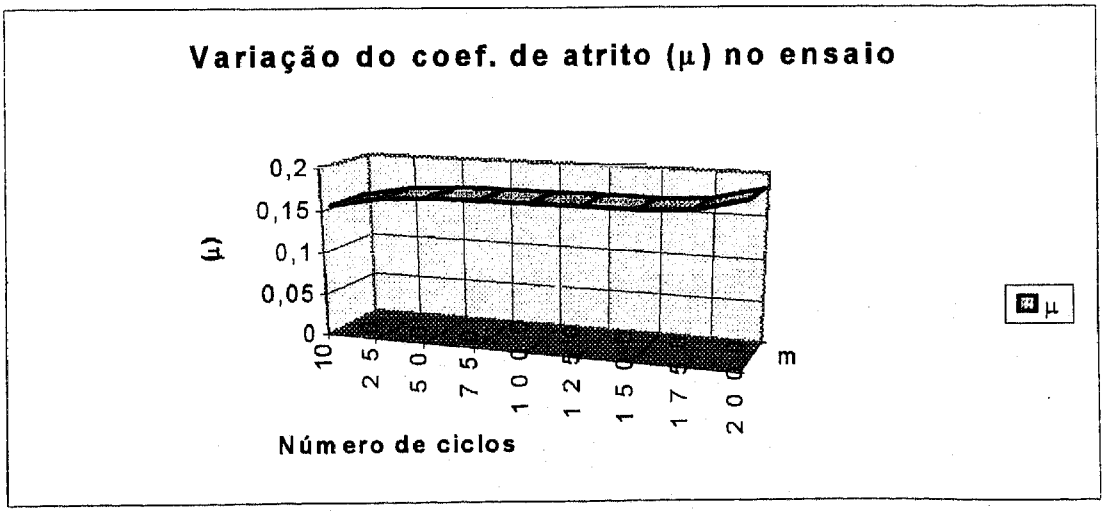
Ensaio Nº	47	
Data :	96/11/27	
Temperatura Ambiente :	18	°C
Humidade do Ar :	78	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/2340	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,8	mg
Força de atrito inicial :	10,7	N

Fenómenos observados

Desgaste pouco acentuado do patim , observado de uma forma generalizada nos picos das suas rugosidades .
Desgaste muito reduzido da pista , com ligeiras marcas de sulcos na sua superfície .
O coeficiente de atrito subiu de forma moderada na fase inicial e final do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

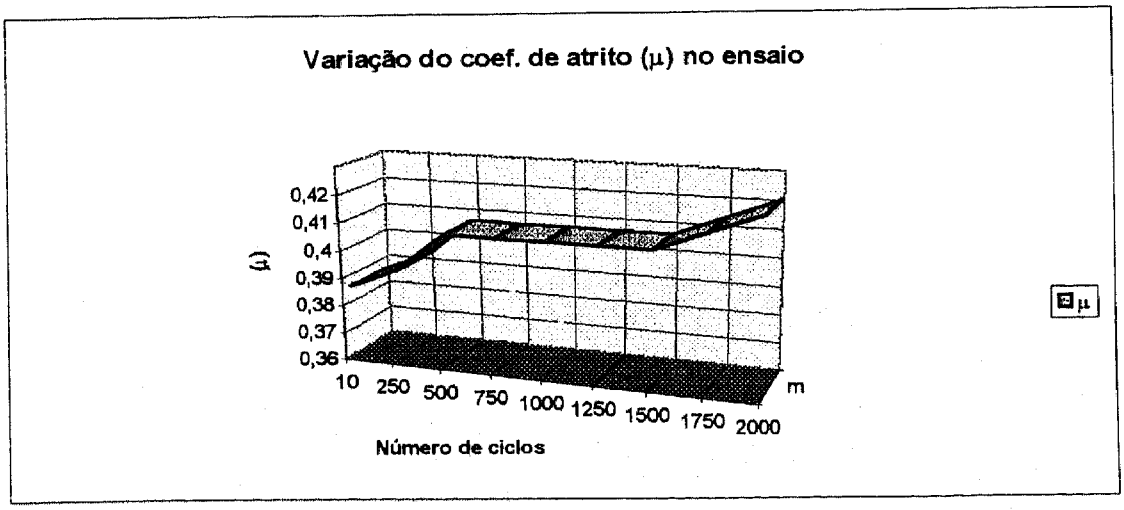
Ensaio Nº	48	
Data :	96/11/27	
Temperatura Ambiente :	19	°C
Humidade do Ar :	77	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/2340	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	1,1	mg
Força de atrito inicial :	27	N

Fenómenos observados

O patim apresentou sinais evidentes de desgaste, sem contudo se notar vestígios da sua rotura.
A pista apresentou sulcos ligeiros nas zonas de contacto com o patim .
O coeficiente de atrito subiu ligeiramente no início do ensaio , e de uma forma mais acentuada na sua fase final , tendo demonstrado alguma estabilidade na fase intermédia .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

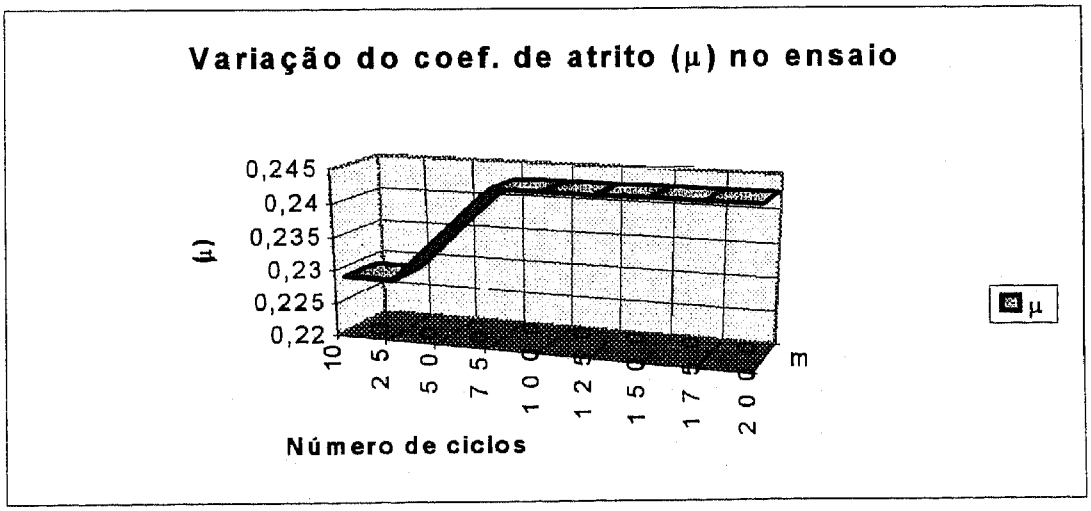
Ensaio Nº	49	
Data :	96/11/28	
Temperatura Ambiente :	16	°C
Humidade do Ar :	80	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/2340	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,5	mg
Força de atrito inicial :	16	N

Fenómenos observados

Desgaste muito ligeiro da superfície do patim .
Desgaste reduzido da superfície da pista,com ligeiras marcas de sulcos muito pouco profundos.
O coeficiente de atrito , após um ligeiro crescimento na fase inicial do ensaio , estabilizou até ao seu termo .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

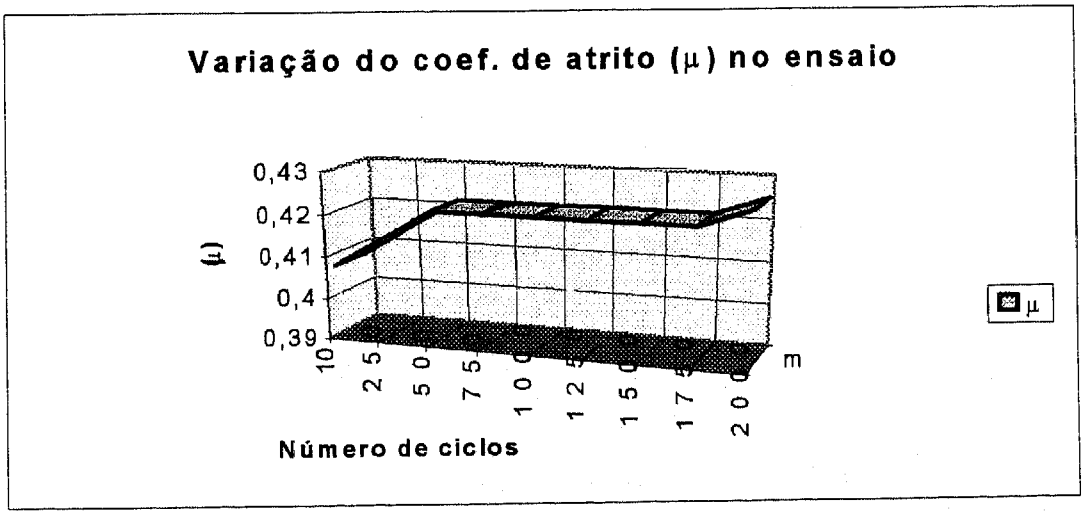
Ensaio Nº	50	
Data :	96/11/28	
Temperatura Ambiente :	17	ºC
Humidade do Ar :	78	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/2340	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	1,1	mg
Força de atrito inicial :	28,5	N

Fenómenos observados

Desgaste pouco significativo do patim .
A pista denotou marcas do contacto com o patim , sendo visíveis sulcos pouco profundos .
O coeficiente de atrito , após uma fase inicial de crescimento moderado estabilizou , voltando a aumentar de forma pouco significativa na fase final do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

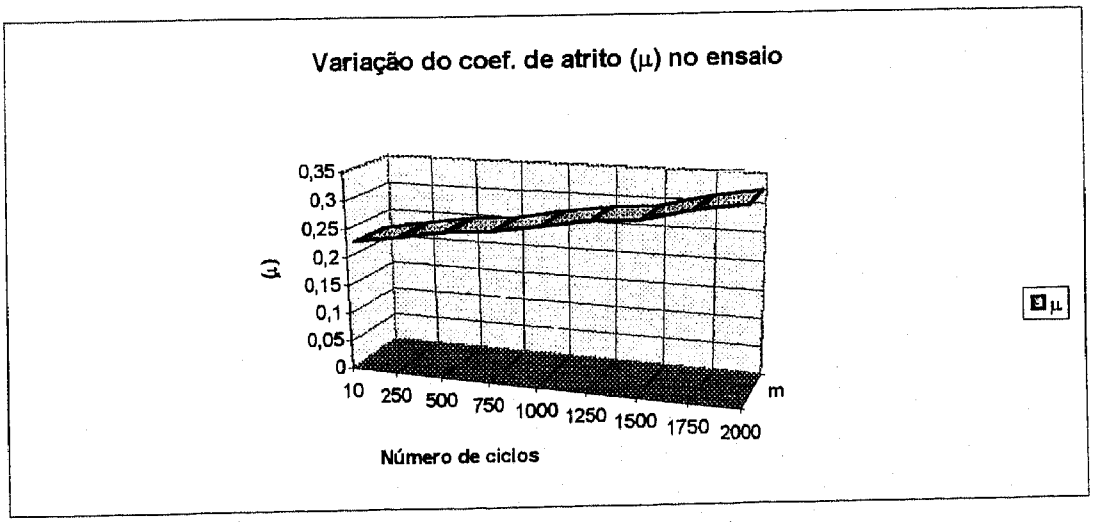
Ensaio Nº	51	
Data :	96/11/28	
Temperatura Ambiente :	17	ºC
Humidade do Ar :	78	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	C220	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade Do Patim / Pista (Ra) :	5,83 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	920/2340	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,1	mg
Força de atrito inicial :	15,5	N

Fenómenos observados

O patim apresentou alguns sintomas de desgaste nos picos das rugosidades , sendo visível a sua remoção parcial .
A pista apresentou um desgaste reduzido , sob a forma de sulcos de muito baixa profundidade .
O coeficiente de atrito subiu de uma forma consistente durante todo o ensaio , correspondendo à libertação de partículas de desgaste , principalmente do patim , e ao início da degradação da pista .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

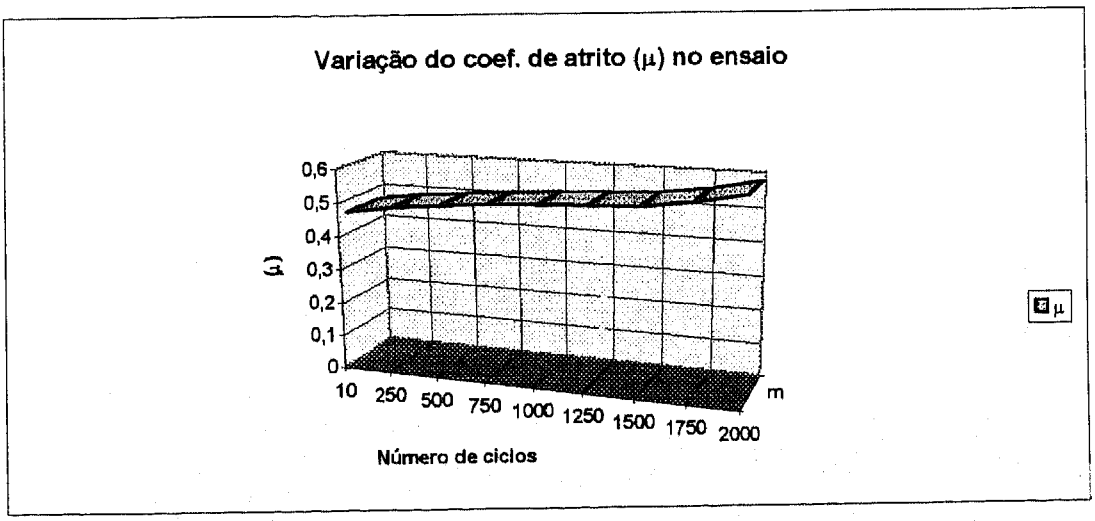
Ensaio Nº	52	
Data :	96/11/29	
Temperatura Ambiente :	18	ºC
Humidade do Ar :	76	%
Superfície da Pista :	ZrN	
Superfície do Patim :	C220	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	5,83 / 0,733	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	920/2340	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	3,2	mg
Força de atrito inicial :	32,5	N

Fenómenos observados

O patim apresentou ligeiras marcas de desgaste em alguns dos picos das suas rugosidades , mas de uma forma não homogénea .
A pista apresentou sulcos nas zonas de contacto com os picos de rugosidade do patim .
O coeficiente de atrito cresceu de forma consistente desde o início até ao final do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

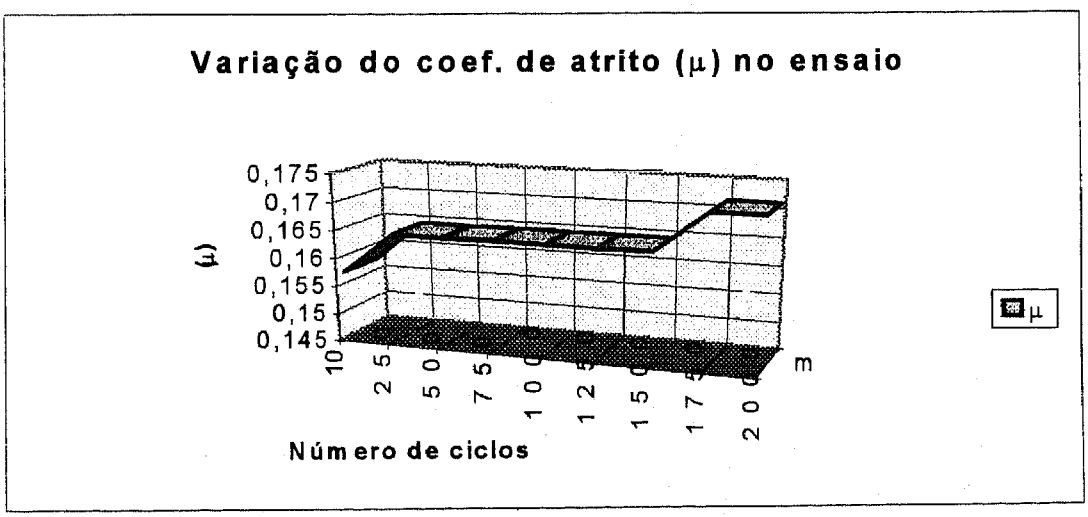
Ensaio Nº	53	
Data :	96/11/29	
Temperatura Ambiente :	18	°C
Humidade do Ar :	76	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/2080	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,5	mg
Força de atrito inicial :	11	N

Fenómenos observados

O patim apresentou um desgaste que podemos considerar mínimo .
A pista apresentou algum desgaste , sob a forma de pequenos sulcos .
O coeficiente de atrito denotou um ligeiro crescimento na fase final do ensaio , causado pelo início da degradação da superfície da pista .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

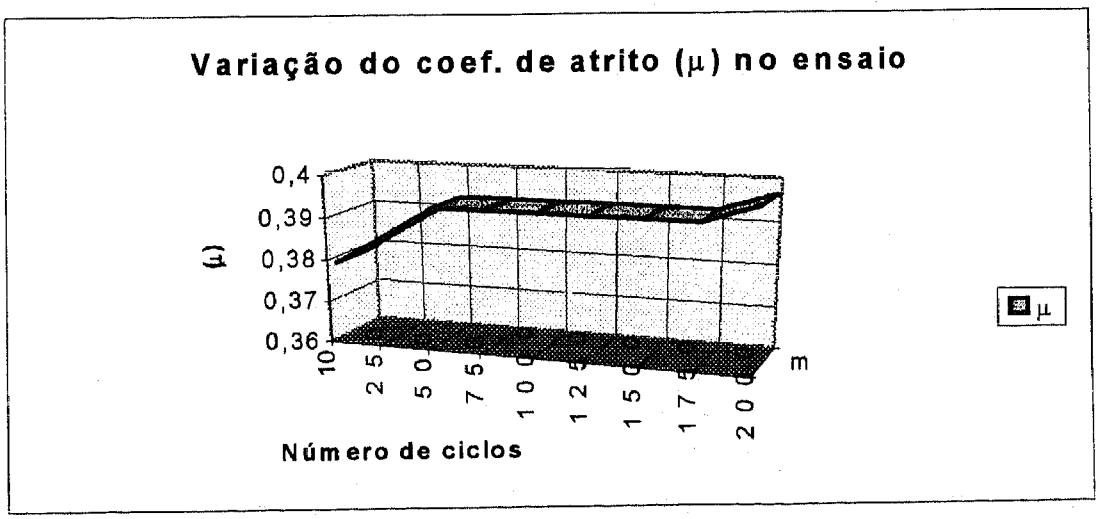
Ensaio Nº	54	
Data :	96/11/29	
Temperatura Ambiente :	19	ºC
Humidade do Ar :	75	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	TiN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,73 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	1960/2080	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,8	mg
Força de atrito inicial :	26,5	N

Fenómenos observados

A superfície do patim apresentou algumas marcas ligeiras de desgaste nos picos das rugosidades .
A pista denotou algum desgaste , sob a forma de sulcos .
O coeficiente de atrito apresentou um maior crescimento na fase final , devido ao início da degradação da superfície da pista ,e consequente libertação de pequenas partículas de desgaste .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

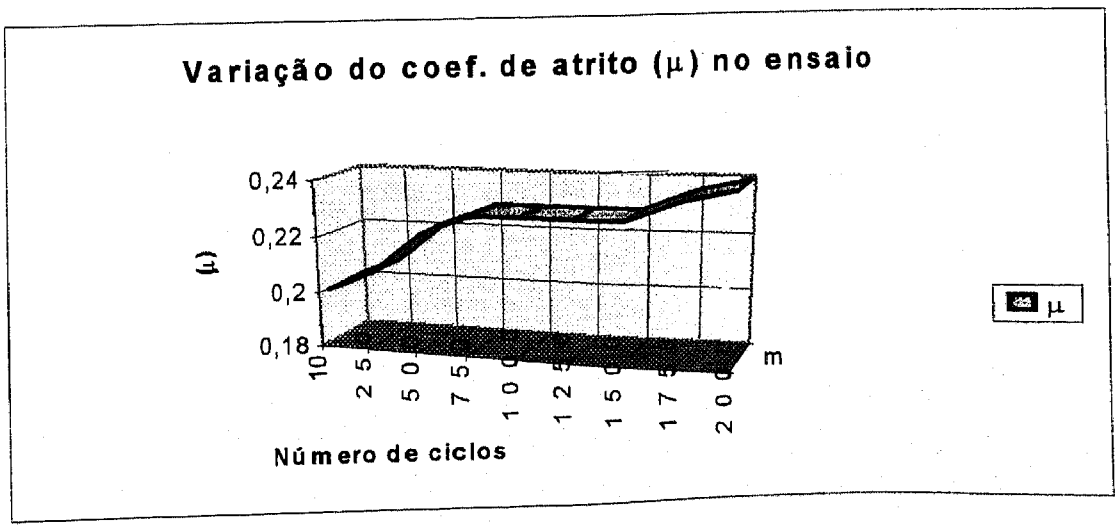
Ensaio Nº	55	
Data :	96/12/02	
Temperatura Ambiente :	17	°C
Humidade do Ar :	78	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/2080	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,6	mg
Força de atrito inicial :	14	N

Fenómenos observados

Desgaste muito pequeno no patim , observado apenas nos picos das rugosidades .
A superfície da pista apresentou um aspecto após ensaio praticamente idêntico ao seu aspecto inicial .
O coeficiente de atrito subiu homogéneamente durante praticamente todo o ensaio , mas de forma pouco significativa .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

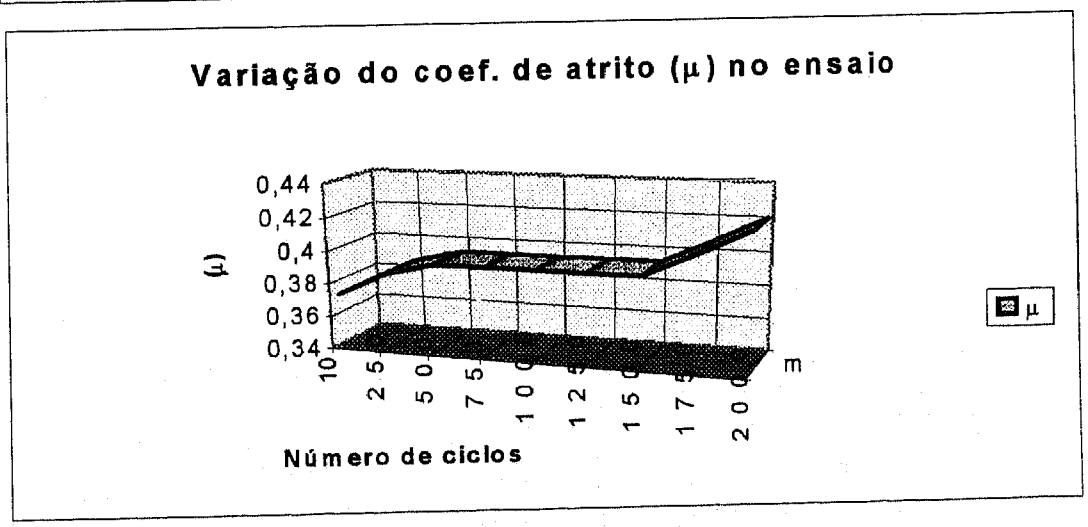
Ensaio Nº	56	
Data :	96/12/02	
Temperatura Ambiente :	17	ºC
Humidade do Ar :	78	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	ZrN	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	3,28 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2340/2080	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	1,3	mg
Força de atrito inicial :	26	N

Fenómenos observados

O patim apresentou ligeiros sintomas de desgaste nos seus picos , nas zonas do contacto inicial com a pista .
A pista apresentou ligeiras marcas do contacto com a superfície do patim .
O coeficiente de atrito , que após um ligeiro aumento inicial estabilizou , sofreu na última fase do ensaio um incremento maior , devido à libertação de partículas da pista e do patim .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

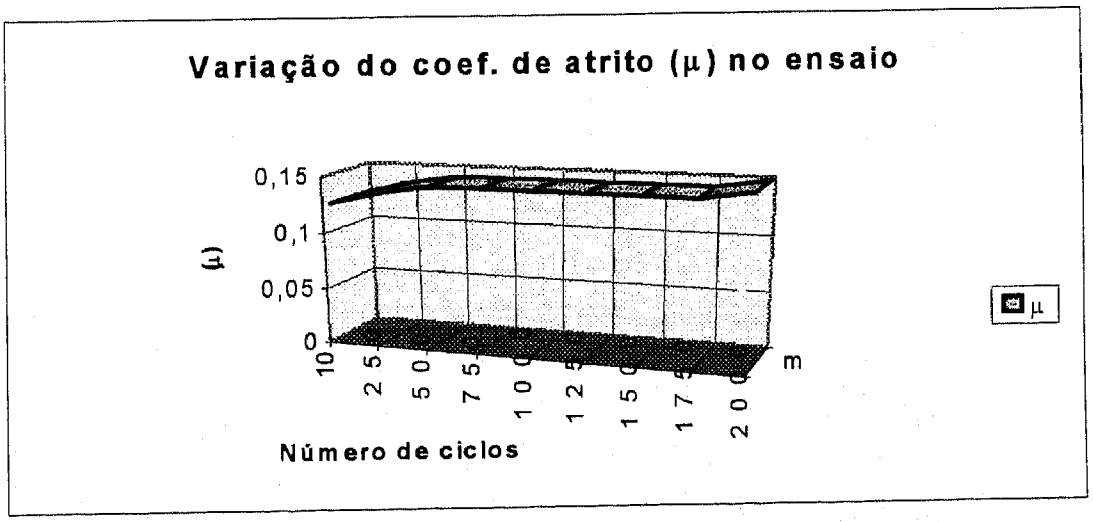
Ensaio Nº	57	
Data :	96/12/02	
Temperatura Ambiente :	18	ºC
Humidade do Ar :	77	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/2080	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,6	mg
Força de atrito inicial :	8,7	N

Fenómenos observados

O patim apresentou marcas quase insignificantes de desgaste , patenteando um aspecto praticamente idêntico ao seu aspecto inicial .
Na pista , o desgaste verificado foi mínimo, sendo visíveis apenas marcas muito ligeiras do contacto com os picos das rugosidades da superfície do patim .
O coeficiente de atrito só registou um incremento , e ligeiro , apartir do 1900 ciclos , correspondendo à libertação das primeiras partículas de desgaste da pista .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

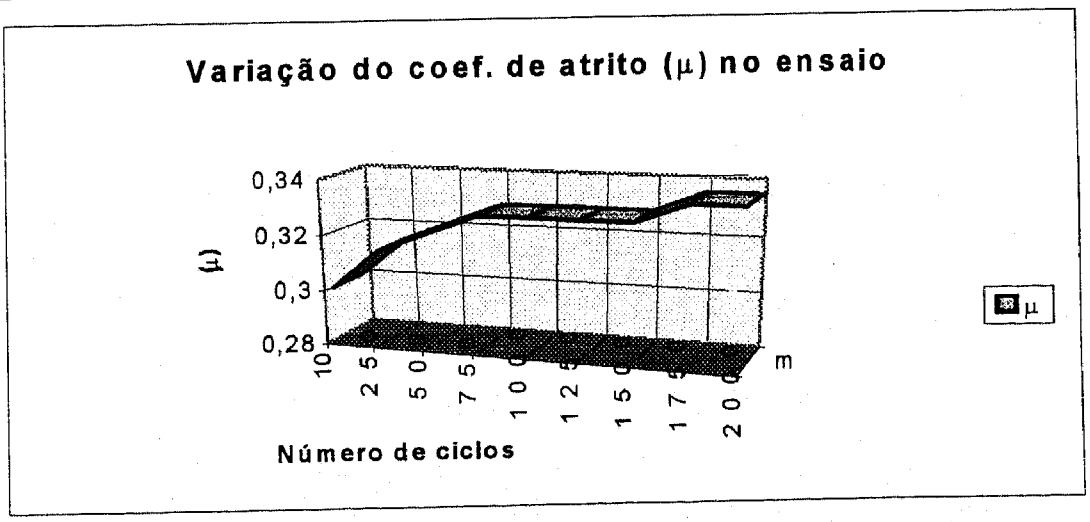
Ensaio Nº	58	
Data :	96/12/02	
Temperatura Ambiente :	18	°C
Humidade do Ar :	77	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	(TiZr)N	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	2,81 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	2080/2080	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	0,8	mg
Força de atrito inicial :	21	N

Fenómenos observados

O patim apresentou sintomas de desgaste que poderemos considerar ligeiros , sem qualquer indício de rotura do revestimento .
A pista apresentou apenas marcas ligeiras do contacto .
O coeficiente de atrito subiu muito ligeiramente durante o ensaio , notando-se uma maior tendência para um incremento no seu crescimento na fase final do ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

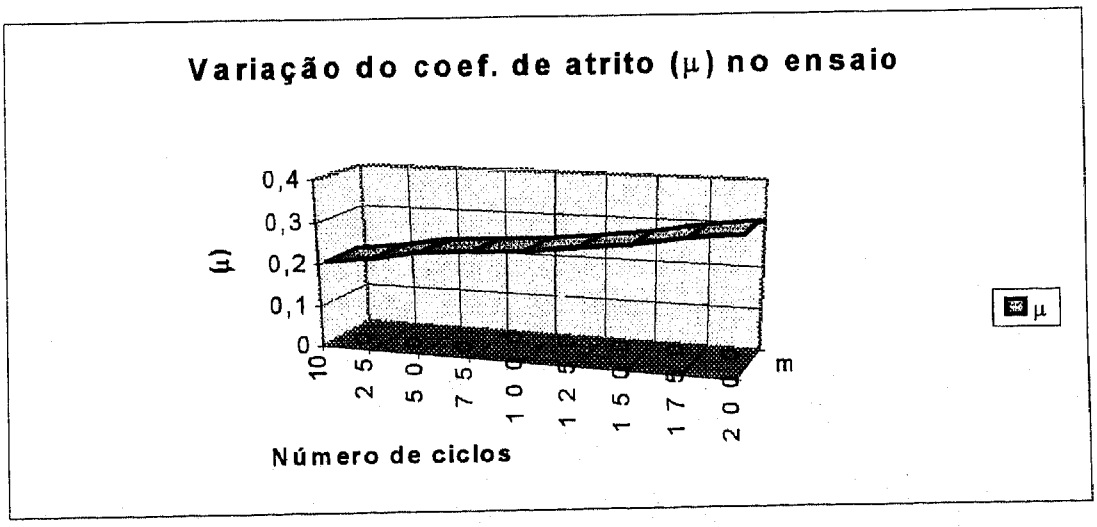
Ensaio Nº	59	
Data :	96/12/03	
Temperatura Ambiente :	16	°C
Humidade do Ar :	75	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	C220	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	1	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	5,83 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	920/2080	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,3	mg
Força de atrito inicial :	14	N

Fenómenos observados

A superfície do patim apresentou algum desgaste , que se tornou visível pelo alisamento parcial dos picos das rugosidades da sua superfície .
A pista apresentou ligeiros sintomas de desgaste , vperceptíveis pela observação de finíssimas marcas de contacto com os picos do patim .
O coeficiente de atrito , relativamente baixo à partida , aumento de forma significativa durante todo o ensaio .



RELATÓRIO DE ENSAIO

Parâmetros do ensaio

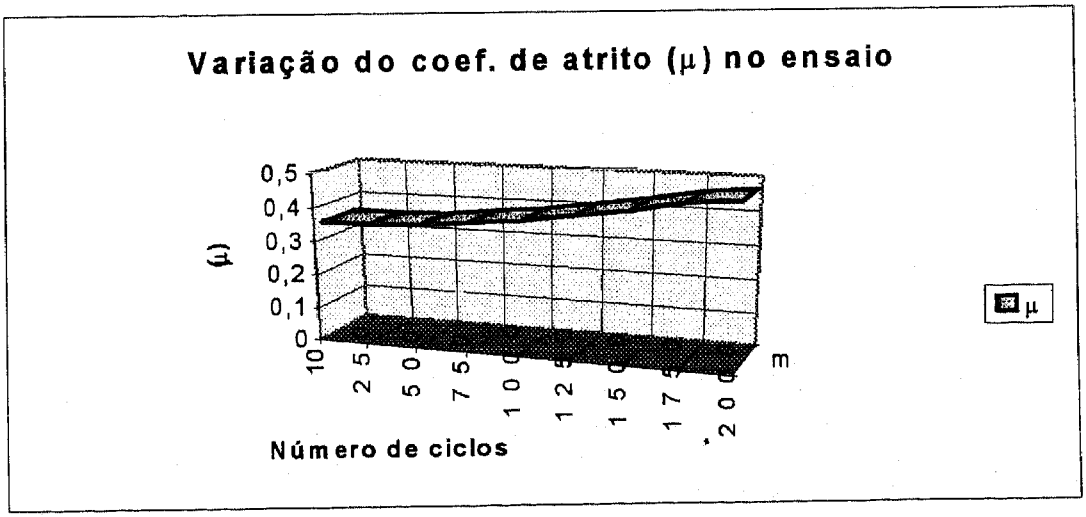
Ensaio Nº	60	
Data :	96/12/03	
Temperatura Ambiente :	17	°C
Humidade do Ar :	74	%
Superfície da Pista :	(TiZr)N	
Superfície do Patim :	C220	
Nº de ciclos realizado :	2000	Rotações
Carga aplicada :	70	N
Velocidade de deslizamento :	3	m/s
Rugosidade do Patim / Pista (Ra) :	5,83 / 0,553	µm
Dureza superficial do Patim / Pista :	920/2080	HV
Tipo de contacto :	Lubrificado	
Tipo de lubrificante :	ISO VG 220	

Resultados do ensaio

Massa perdida pelo patim :	2,9	mg
Força de atrito inicial :	24,5	N

Fenómenos observados

Desgaste significativo do patim , com remoção de parte significativa dos picos das estrias de maquinagem .
A pista apresentou alguns sintomas de desgaste nas zonas de deslizamento dos picos da superfície do patim .
O coeficiente de atrito aumentou durante todo o ensaio , e de forma mais significativa no fim do ensaio .



ANEXO

F

QUADRO / RESUMO DE RESULTADOS OBTIDOS EM TRABALHOS EXPERIMENTAIS REALIZADOS COM REVESTIMENTOS EFECTUADOS POR P.V.D. (Holmberg e Matthews,1994)

TRIBOLOGY DATA SHEET FOR COATINGS: TITANIUM NITRIDE COATINGS

REFERENCE			COATING					COUNTERFACE	
No.	Year	Authors	Film	Deposition method	Substrate	Thickness μm	Roughn./Hardn. R_a, μm/H,	Material	Roughn./Hardn. R_a, μm/H,
1.	1983	Sundquist & al.	TiN	Ion plating	Steel 40CrMoVo51	4		Mild steel	
2.	1987	Matthews & al.	TiN TiN TiN	Ion plating	HSS	1	0.06	Tool steel TiC Copper	
3.	1980	Jamal & al.	TiN	ARE	Stainless steel 304C	4-8	0.3	Steel TiC/440C TiN/440C Al	0.1
4.	1980	Habig & al.	TiN	CVD	Steel 205CrWMoV	3	0.9	Steel	1.7
5.	1989	Peebles & Pope	TiN	Reactive evaporation	Steel 304SS			Steel 440CSS	
6.	1990	Knight & al.	TiN	PVD sputtering evaporative CVD	Steel 835M30 Steel 835M30	2 2-5	0.14-0.88 0.65-0.88	Diamond	
7.	1987	Shimazki & Winer	TiN	Sputtering rf/reactive PVD	Tool steel	0.1-2.7	0.28-0.9	Steel	
8.	1990	Sue & Troue	TiN	PVD arc evaporation	Steel ring AISI 4620	10	0.1	Steel AISI 01 Block	0.25-0.3
9.	1990	Kennedy & Tang	TiN+Ti	PVD arc evaporation	Steel Inconel 625	25		Carbon graphite	
10.	1990	Bull & al.	TiN	PVD sputtering	Stainless steel	5		Steel TiN	
11.	1981	Hintermann	TiN	CVD	Steel		0.1	Steel TiC TiN	
12.	1989	Gardos	TiN					TiN	
13.	1985	Mäkelä & Valli	TiN	PVD	Steel HSS Pin	0.6-0.8	0.05-0.09	Tool Steel TiN TiC	0.05-0.09
14.	1979	Suri & al.	TiN	Bias activated reactive evaporation	Stainless steel→ Aluminium→ Titanium→	4-6		Stainless steel 440C	
15.	1990	Habig	TiN	CVD	X205CrWMo121	3	R_a = 1 μm	TiN on	R_a = 1 μm
16.	1991	Malliet & al.	TiN	Ion plating	HSS ASP23	1.5	0.24	Chromium steel 1.2080	0.02/63-66HRC
17.	1991	Singer & al.	TiN	Reactive magnetron sputtering	Toolsteel M2	0.2-5	0.06-0.1→ 0.004→	Steel 52100→ Steel 52100→ Sapphire→	
18.	1992	Stott & al.	TiN	PVD CVD	Stainless steel 321	3-5	0.35	Stainless steel 321	0.35

EXPERIMENTS				RESULTS		
Geometry	Speed m/s	Load N	Lubrication Environment	Friction	Wear, lifetime, debris Wear rate, 10^{-6} · mm^3/Nm	Comments/Conclusions
Pin-on-disc	0.2	0.5-10	Dry	0.2 at 0.5 N 0.4 at 1 N 0.7 at 10 N	2-10 times increased lifetime	Increase of friction with load Decreased wear even after failure Friction for St–St μ = 0.7
Pin-on-disc	0.2	5	Dry	0.15-0.2 0.7	2.8 2.1	Influence of counterface material
Pin-on-disc	0.1	40	Dry	0.75 0.2 0.45		Low μ & w with hard wear couples Al does not support hard coatings Lubrication decreased μ
Pin-on-disc	0.1	2.5 5 50-500	Dry Dry Lubr.	0.17-0.21 0.1-0.38 0.1-0.06	0.76 0.2 -	μ = 0.38 after coating failure
Pin-on-plate Pin ∅ 0.8, 15 & 54 mm	0.025	64MPa 150MPa 1060MPa 0.33N		0.17-0.24 0.15		No influence of pressure on μ or w Ti underlayer improves w but μ is the same Vacuum → rapid failure
Scratch test Stylus ∅ 100-200 μm	0.0005	0.25-10	Dry	0.2 0.2-0.35		μ increases with load
Pin-on-flat Reciprocating Pin ∅ 0.25 in	0.0025 Amplitude 2 cm	0.67–550MPa 4.6–1000MPa	Dry	0.6-0.9 Uncoated =0.45-0.85		Formation of transfer layer TiN μ higher than for uncoated Influence of h on μ
Block-on-ring Reciprocating	0.07	1090	Dry	0.62-0.67	Reduced wear by 5 times Aggomer. α-Fe_2O_3 debris Little Ti_3O	Surface oxidation Abrasive & oxidative wear Transfer layer on steel
Ring-on-ring "Drill press converted"	4.7	50–125kPa 100–250kPa	Dry		Spalling	Transfer film of carbon No influence of h on w
Pin-on-disc Ball ∅ 3 mm	0.075	2.5		0.3-0.7 0.1-0.7	1-10000	Wear mechanisms: adhesion, oxidation, abrasion Infl. v → w: < 0.11m/s no infl.; > 0.11 increase Influence on microstructure → w
Pin-on-disc	0.01	5	Dry	0.49 0.16-0.31 0.19	10 1 0.5	Counterface influence
						Formation of TiO_2 layer
Pin-on-disc	0.2	5	Dry	0.6-0.9 0.1 0.15-0.7	0.5-5 0.2 2	Both pin and disc coated and uncoated → Influence of geometry Friction curves
Pin-on-disc 120° cone Tip ∅ 0.125 mm	0.2-0.23	4	Dry	1.15 0.92 0.92		Lubrication decreased μ to 0.175-0.225
Pin-on-disc	0.1	2.5	Air, 50%RH Vacuum	0.2 0.5		Friction depends strongly on the oxygen pressure of the environment
Pin-on-disc Ball ∅ 10 mm	0.163	0.5-13	Air, T = 22°C RH = 52%	0.55-1.15	0.1-0.8	
Ball-on-flat Unidirectional Ball ∅ 3.2-12.7 mm	0.0001	10N	Air RH = 30%	0.5-0.7 0.15-0.2 0.05-0.15		Higher friction coefficients correspond to rougher surfaces and more debris in the wear track
Pin-on-disc Ball ∅ 50 mm Reciprocating	0.001	16.3	Carbon dioxide 20°C→ 300°C→ 500°C→	 0.2 0.4 0.6		Increased friction coefficient with increased temperature in carbon dioxide environment

Appendix

390

TRIBOLOGY DATA SHEET FOR COATINGS: NITRIDES (-TiN excluded)

REFERENCE			COATING					COUNTERFACE	
No.	Year	Authors	Film	Deposition method	Substrate	Thickness µm	Roughn./Hardn. R_a, µm/H,	Material	Roughn./Hardn. R_a, µm/H,
1.	1990a	Ronkainen & al.	(Ti, Al)N	Ion plating	Steel ASP23	2-8	0.04	SteelM50	
2.	1990	Roos & al.	(Ti, Al)N	PVD	Steel HSS	3.5		Steel Cr5020	
3.	1990a	Bull & Rickerby	CrN	Ion plating	Steel	2-9		Steel	
4.	1987	Miyoshi & al.	BN	Ion beam dep. PVD	Silicon, SiO_2, GaAs, InP	0.1		Diamond Tip Ø 0.4 mm	
5.	1989	Miyoshi	BN	Ion beam dep. PVD				Stainless steel 304 & 440C Ti	
6.	1988	Elena & al.	BN	Rf magnetron sputtering	WC-Co	1		Diamond Tip Ø 0.4 mm	
7.	1989	Inagawa & al.	C-BN	Reactive evaporation	Silicon	0.4		Stainless steel	
8.	1990b	Ronkainen & al.	Ti(B, N)	EB PVD r.f. magn. sput.	Steel ASP23	5 8	0.04	SteelM50	
9.	1990	Roos & al.	(Ti, Nb)N	PVD	Steel HSS	5.5		Steel Cr5020	
10.	1992	Coll & al.	(Ti, Al)N	Arc evaporation	Steel HSS M2 Ball	4		Steel disc AISI 4135	
11.	1993a	Vancoille & al.	(Ti, Al)N→ (Ti, Nb)N→ Ti(C, N)→	Ion plating	Steel HSS M2	2-2.5	0.01	Corrondum (α-Al_2O_3)	0.2
12.	1991	Watanabe & al.	C-BN→ a-BN→ h-BN	Ion plating	Silicon wafer			SS 440C	0.1/4.3GPa

EXPERIMENTS				RESULTS		
Geometry	Speed m/s	Load N	Lubrication Environment	Friction	Wear, lifetime, debris Wear rate, 10^{-6} · mm^3/Nm	Comments/Conclusions
Pin-on-disc Ball Ø 10 mm	0.1	10	Dry	0.7-0.9	Pin: 3 Disc: 25-60	
Pin-on-disc Ball Ø 10 mm	0.4	4	Dry		Pin: 2 x TiN	
Pin-on-disc Ball Ø 3 mm	0.1	2.75	Dry	0.6-0.8	Disc: 10 (0.1)	Good abrasive wear resistance Transfer layer on ball
Scratch test Single pass Dist. 10 mm	0.0002	1-15 5-25GPa	Dry	0.05-0.2		Elastic & plastic deformation BN film is amorphous
Scratch test Single pass Dist. 10 mm	0.0002	1-15 5-25GPa	Dry	0.08-0.12		
Scratch test Single pass		2-20	Dry	0.05-0.3		
Ring-on-disc		10		0.35		μ = 0.05 in vacuum and 400°C
Pin-on-disc Ball Ø 10 mm	0.1	10	Dry	0.68-0.78 0.6-0.9	Pin: 0.8 Disc: 10-20	
Pin-on-disc Ball Ø 10 mm	0.4	4	Dry		Pin = 3 x TiN = TiAlN	
Pin-on-disc Ball Ø30 mm	0.5-5	2	Dry, RH = 50 %	0.37-0.74	Pin: 0.37-1.24	
Pin-on-disc Ball Ø10 mm	0.1	5	Dry, T = 25°C RH = 50-70%	1.0-1.4 0.9-1.4 0.1-0.4		Wear decreases with increasing speed
Ball-on-flat Reciprocal Ball Ø6.35 mm	0.0017	5	Dry RH = 50-60%	0.3 0.8-1.0 0.8-1.0	C-BN has less wear than a-BN and h-BN	

TRIBOLOGY DATA SHEET FOR COATINGS: CARBIDES

REFERENCE			COATING					COUNTERFACE	
No.	Year	Authors	Film	Deposition method	Substrate	Thickness µm	Roughn./Hardn. R_a, µm/H_v	Material	Roughn./Hardn. R_a, µm/H_v
1.	1981	Hintermann	TiC SiC Cr_xC_y	CVD CVD CVD	Steel Steel Steel		0.1 0.1 0.1	Steel TiC TiN AlO SiC SiC Steel Steel	
2.	1960	Mordike			WC TiC TaC TiC NbC BC			WC WC TaC Graphite NbC BC	
3.	1987	Boving & Hintermann	TiC	CVD	Steel	4		Steel52100	
4.	1987	Matthews & al.	TiC (ball)	Ion plating PVD	Steel			Tool steel TiN on steel	$58H_{RC}$ 0.02-0.04Ra
5.	1990	Knight & al.	TiC	CVD	Steel	5	1700-2000	Diamond stylus	
6.	1980	Jamal & al.	TiC	Activated Reactive Evaporation = ARE	Steel 440C ball	4-8	0.3/ 2800-3000	Steel TiC TiN TiC/Ti Ti&Al TiN+Ti_2N/Ti Ti+TiC/Al TiN+Ti_2N/Al	0.1/300 2800-3000 1800-2000
7.	1980	Habig & al.	TiC CrxCy	CVD "	Steel 62HRC	5 10	1/2000 1/1500	Steel " -	1.7 1.7
8.	1979	Suri & al.	TiC	Bias activated reactive evaporation	Stainless steel Aluminum Titanium	4-6	0.1/3000	Stainless steel	0.1/300
9.	1989	Farges & al.	WC + Cr subl.	PACVD	Tool steel	16		Steel TiN + steel	52HRC
10.	1988	Srivastava & al.	WC	R.f. reactive magnetron sputtering	Stainless steel	7	3200	Stainless steel	
11.	1987	Lindgren & al.	CrC	Detonation gun plasmagun		~20-100			
12.	1988	Rey	BC	CVD	Graphite			BC Steel42CD4 SiC AlO Si_3N_4 ZrO	
13.	1990	Habig	TiC	CVD	Steel X205CrWMo121	5	2.7	TiC coated steel X205CrWMo121	62HRC

EXPERIMENTS				RESULTS		
Geometry	Speed m/s	Load N	Lubrication Environment	Friction	Wear, lifetime, debris Wear rate, 10^{-6} · mm^3/Nm	Comments/Conclusions
Pin-on-disc	0.01	5	Dry	0.25 0.22-0.32 0.25-0.31 0.19 0.25-0.35 0.27-0.47 0.23 0.79	Disc: 1.5 Disc: 3 Disc: 5 Disc: 2 Disc: 2-7 Disc: 4-8 Disc: 0.5-0.7 Disc: 15	
Ring-on-ring	0.03	0.0025 -0.3	Dry	0.18 0.2 0.2 0.15 0.2 0.12		All carbides similar μ Increase in μ after ~1000°C Bulk carbides!
Pin-on-disc			Dry Humid Vacuum	0.3 0.2 0.3		No influence of vacuum Formation of TiO_2 improves friction
Pin-on-disc Ball Ø 50 mm	0.2	5		0.3-0.4 0.15-0.2	Coated pin 0.4 " " 0.9	TiC sliding against TiN ⇒ low friction
Scratch Tip Ø 0.1-0.25 mm	0.0005	0.25-10		0.2-0.25		μ increased with load μ depends on plastic flow
Pin-on-disc	0.1	40	Dry	0.5 0.2 0.2 0.175 0.8-0.85 0.2 0.3 0.35	High Low Medium Low High Low High High	Influence of counterface Lubrication decreased μ
Pin-on-disc "	0.1 "	2.5-5 "	Dry (lubr) "	0.11-0.16 0.24-0.51	0.6 3-4	No running-in wear /Lubr μ = 0.09 - 0.105 Higher wear /Lubr μ = 0.06 - 0.1
Pin-on-disc	0.2	4	Dry (lubr)	0.7 0.9 1.07	Low Medium Medium	High friction & low wear
Pin-on-disc Ball Ø 20 mm	0.015	1	Dry	0.3-0.4 0.25-0.5	Low Low	Pin wear reduced by polishing but not friction
Pin-on-disc	0.158	100	Lubric. SAE30 Mobil oil	0.09-0.25	Minimum with h = 1-2 μm	Coating thickness influence on wear
Pin-on-disc Reciprocating	0.007-0.7	0.7-7MPa	T = 20-800°C	0.4-0.6		Different coating compositions and atmospheres
Pin-on-disc Reciprocating	0.0016	10	Dry	0.15 0.2-0.4 0.2-0.3 0.2-0.4 0.25-0.35 0.2-0.35		Not major influence of counterface BC/BC best tribocombination
Pin-on-disc	0.1	2.5	Air: Rh = 50%→ Vacuum→	0.2 0.5		Main wear mechanisms are polishing, tribooxidation and adhesion

TRIBOLOGY DATA SHEET FOR COATINGS: OXIDES AND BORIDES

REFERENCE			COATING					COUNTERFACE	
No.	Year	Authors	Film	Deposition method	Substrate	Thickness μm	Roughn./Hardn. R_a, μm/H_v	Material	Roughn./Hardn. R_a, μm/H_v
1.	1981	Hintermann	Al_2O_3	CVD	Cemented carbide tool			Steel 100Cr6 TiC	
2.	1987 1988	Roth & al.	Al_2O_3	R.f. magnetron sputtering	Cast iron	4	0.36/300HV 0.05	Steel 155CrVMo121	0.26/1000Hv
3.	1987	Matthews & al..	Ti-O	Ion plating	HSS ball	2	0.06/2000-2400H_k	Steel Copper	58HRC 80Hv
4.	1987b	Fusaro	CdO	Sputtering	Steel	0.05-0.1		Steel	
5.	1988	Levy	TiB_2	CVD	WC-Co	30-40			
6.	1981	Hintermann	Fe_2B	CVD	Cemented carbide tools			SteelCr6 pin	
7.	1980	Habig & al.	Fe_2B	CVD	Cemented carbide tools			Fe_2B	
8.	1990	Habig	TiB_2	Thermochemical treatment	Ti-6%Al-4%V	30	2.8	TiB_2 coated Ti-6%Al-4%V	

EXPERIMENTS				RESULTS		
Geometry	Speed m/s	Load N	Lubrication Environment	Friction	Wear, lifetime, debris Wear rate, $10^{-6} \cdot mm^3/Nm$	Comments/Conclusions
Pin-on-disc	0.01 0.01 0.01	20 20 5	Dry " "	0.45 0.19 0.62	Disc: 75 Pin: 0.5 Disc: 0.5 Pin: 0.005 Disc: 0.36 Pin: 0.66	Al_2O_3 sliding against TiC ⇒ low wear and friction
Plate on cylinder	0.04	100Pa	Dry		Low wear compared to uncoated	
Pin-on-disc	0.2	5	Dry	0.2-0.35 0.5-0.65	Pin: 0.8	Coating wear ~TiN & TiC
Pin-on-disc	0.26	10	Dry	0.17-0.23	0.1	
		0.17MPa	T = 19-36°C T = 540°C	0.62-0.82 1.06	Extremely low compared to plasma sprayed	Very low wear
Pin-on-disc	0.01	5		0.76	Disc: 0 Pin: 12	
Pin-on-disc	0.01	5		0.40	0.06	Extremely low wear < TiN & TiC
Pin-on-disc	0.1	2.5	Air: RH = 50%→ Vacuum→	0.4-0.6 0.75		Wear volume was six times higher than for TiN

CURRICULUM VITAE

CURRICULUM VITAE

1. DADOS PESSOAIS

NOME : ***Francisco José Gomes da Silva***
MORADA : Rua da Granja,152 - Águas Santas - 4445 Aguas Santas Maia
TELEFONE : 02-9710905
B. I. : 5951254 de 93/08/23 - Arquivo de Lisboa
CONTRIBUINTE Nº 146893751
DATA DE NASCIMENTO : 63/10/01
NATURALIDADE : Massarelos - Porto - PORTUGAL

2. CURRICULUM ACADÉMICO

Bacharelato em Engenharia Mecânica, terminado no ISEP, a 88/10/14.
Licenciatura em Engenharia Mecânica - Gestão da Produção, terminada no ISEP, a 92/09/15.
Especialização em Materiais e Produção, terminada no LNETI/DEMEC, a 89/07/28.
Parte escolar do Mestrado em Meteriais e Processos de Fabrico concluído (Edição 94/95 - FEUP)

A desenvolver uma tese sobre Revestimentos efectuados por P.V.D. (Revestimentos Duros), a apresentar até Janeiro de 1997.

3. FORMAÇÃO COMPLEMENTAR

Curso de Técnico de Eléctrónica Digital (Esc. Sec. Fontes Pereira de Melo)
Inumeras Conferencias e Cursos de Curta Duração, ligados a Novas Tecnologias e Gestão.

4. CURRICULUM PROFISSIONAL

Empresário em nome individual desde 1982, proprietário e gestor da ELDITRAN-EL. DIGITAL E TRANSFORMADORES, ligada ao fabrico de Aparelhos Eléctricos, sendo esta empresa fornecedora da maioria das empresas metalomecânicas do país, e mais recentemente, exportadora para países da CE.

Estágio efectuado na SUNVIAUTO,S.A. em Pedroso (Carvalhos), empresa ligada ao fabrico de componentes para automóveis,estruturas metálicas para estofos, e outros. Promovido a Chefe de Serviços de Planeamento e Controlo da Produção ao fim de 6 meses de serviço. Começo do estágio em Setembro de 1988.
Saída da empresa a Agosto de 1989 por convite da FELINO,S.A.

Responsável pelo Planeamento e Produção da Metalomecânica da FELINO-FUNDIÇÃO E CONST. MECÂNICAS,S.A., ligada ao fabrico de Máquinas para Padaria e Confeitaria, e redutores de velocidade. Início da actividade em Setembro de 1989 e fim a Novembro de 1990, por incompatibilidade de horário com a licenciatura e a m/ actividade de empresário.

Formador externo do CENFIM (Núcleo de Ermesinde) desde Maio de 1992, e até ao momento.

Docente do ISEP, no Departamento de Engenharia Mecânica, como Assistente na Cadeira de TECNOLOGIA DOS MATERIAIS I, desde Dezembro de 1995.

Aguas Santas, 97.018.06