



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

## RELATÓRIO DE ESTÁGIO

### Aumento da quantidade de perfil produzido por Matriz

Maria Victoria Castro Fernandez

Extrusal S.A.

ORIENTADOR (EMPRESA): Eng. Miguel Oliveira

PROFESSOR SUPERVISOR: Prof. Manuel Vieira

20 de Setembro de 2006

669(047.3)  
LEMM  
2006/FERm

187



**FEUP**  
Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

## **RELATÓRIO DE ESTÁGIO**

# **Aumento da quantidade de perfil produzido por Matriz**

**Maria Victoria Castro Fernandez**

**Extrusal S.A.**

**ORIENTADOR (EMPRESA): Eng. Miguel Oliveira**

**PROFESSOR SUPERVISOR: Prof. Manuel Vieira**

**20 de Setembro de 2006**

669 (dt 3) 667 2006 / cam

|                         |
|-------------------------|
| Univ. do Porto          |
| Faculdade de Engenharia |
| Biblioteca              |
| Nº 105303               |
| COU                     |
| 24 / 02 / 10            |

# Índice

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| 1. Apresentação da Empresa.....              | 3  |
| 2. Objectivo .....                           | 4  |
| 3. Introdução.....                           | 4  |
| 3.1 Processo de produção das matrizes .....  | 5  |
| 3.2 Revestimentos por PVD.....               | 9  |
| 4. Procedimento Experimental.....            | 10 |
| 5. Resultados e análise dos resultados ..... | 14 |
| 5.1 Análise química.....                     | 14 |
| 5.2 Dureza superficial .....                 | 15 |
| 5.3 Adesão do Revestimento .....             | 16 |
| 5.4 Ensaio de Desgaste.....                  | 17 |
| 5.5 Rugosidade .....                         | 18 |
| 5.6 Morfologia do Revestimento (SEM).....    | 19 |
| 6. Conclusão .....                           | 24 |
| 7. Bibliografia.....                         | 26 |
| 8. Anexos.....                               | 27 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Evolução da fábrica ao longo dos anos (1981 - 2000) [1] .....                                       | 3  |
| <b>Figura 2.</b> Esquema da produção de perfis, desde o pedido até à entrega.[1] .....                               | 4  |
| <b>Figura 3.</b> Ciclo de vida de uma matriz no processo de extrusão. [1] .....                                      | 4  |
| <b>Figura 4.</b> Fluxograma de parte da produção de uma matriz. [1] .....                                            | 5  |
| <b>Figura 5.</b> Uma matriz acabada de sair do torno [1].....                                                        | 6  |
| <b>Figura 6.</b> Fotografia que indica as alturas: a), b) e c) são as diferentes alturas duma matriz. [1]...         | 6  |
| <b>Figura 7.</b> Fluxograma com a continuação da produção até que sai da secção. [1] .....                           | 6  |
| <b>Figura 8.</b> Matriz depois de aberta na electroerosão.....                                                       | 6  |
| <b>Figura 9.</b> Desenho da matriz utilizada neste trabalho [1].....                                                 | 7  |
| <b>Figura 10.</b> Esquema do princípio básico do processo de pulverização catódica. [14] .....                       | 9  |
| <b>Figura 11.</b> Esquema do ensaio de adesão. [10] .....                                                            | 13 |
| <b>Figura 12.</b> Esquema de funcionamento do ensaio de desgaste por pino-disco. [13] .....                          | 14 |
| <b>Figura 13.</b> Difractograma de raios-X. ....                                                                     | 15 |
| <b>Figura 14.</b> Microfotografia: (a) Correspondente à carga crítica 1; (b) correspondente à carga crítica 2.....   | 17 |
| <b>Figura 15.</b> Gráfico com ensaio de desgaste do disco, com e sem lubrificação. ....                              | 18 |
| <b>Figura 16.</b> Esquema do desgaste provocado pelo pino no disco, com lubrificante (a) e sem lubrificante (b)..... | 18 |
| <b>Figura 17.</b> Perfil de rugosidade de uma das amostras. ....                                                     | 19 |
| <b>Figura 18.</b> Morfologia do revestimento na amostra de controlo. ....                                            | 20 |
| <b>Figura 19.</b> Crescimento colunar do revestimento na amostra de controlo .....                                   | 20 |
| <b>Figura 20.</b> Uma placa revestida em que são indicadas as zonas onde foram tiradas as fotografias no SEM.....    | 21 |
| <b>Figura 21.</b> Micrografias da zona 1 da figura 20 em amostras apenas nitruradas.....                             | 21 |
| <b>Figura 22.</b> Micrografias das zonas 1, 2, 3, 4 e 5 da figura 20 em amostras apenas nitruradas. ....             | 22 |
| <b>Figura 23.</b> Micrografias tiradas no SEM das zonas 1, 3, 4, 6 da figura 20 .....                                | 23 |
| <b>Figura 24.</b> Micrografia tirada no SEM sem zona determinada .....                                               | 23 |

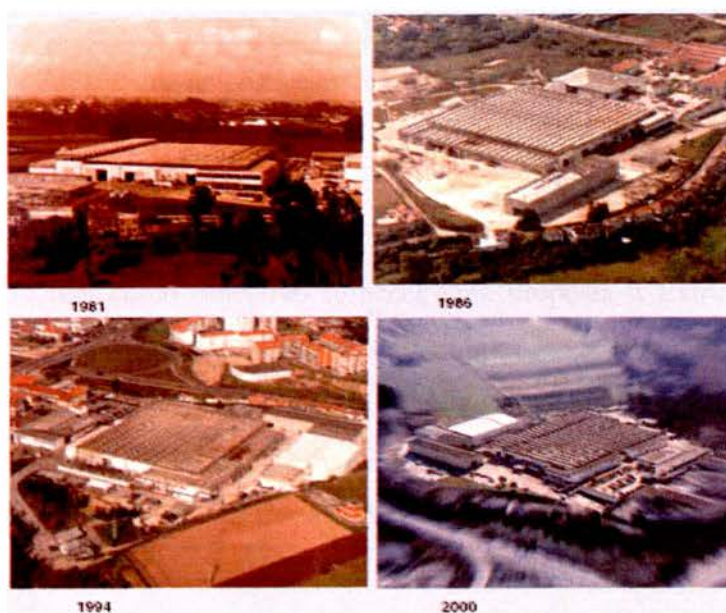
## Índice de Tabelas

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Análise de billetes produzidos por matriz com uma nitruração. [1].....                | 8  |
| <b>Tabela 2.</b> Propriedades mecânicas de dois revestimentos comerciais. [6,7].....                   | 10 |
| <b>Tabela 3.</b> Composição química do revestimento (Ti,Al)N da amostra. ....                          | 14 |
| <b>Tabela 4.</b> Microdurezas Vickers das amostras nitruradas e revestidas (nitruradas +(Ti,Al)N). ... | 15 |
| <b>Tabela 5.</b> Valores da ultramicrodureza e módulo de elasticidade das amostras revestidas. ....    | 16 |
| <b>Tabela 6.</b> Valores das cargas críticas de adesão.....                                            | 16 |
| <b>Tabela 7.</b> Espessura do revestimento na amostra de controlo.....                                 | 19 |
| <b>Tabela 8.</b> Propriedades mecânicas do revestimento de TiAlN produzido pelo IPN. ....              | 24 |
| <b>Tabela 9.</b> Propriedades mecânicas de alguns revestimentos e do aço H13. [5] .....                | 24 |

## 1. Apresentação da Empresa

A Extrusal S.A. foi fundada no início dos anos 70 e foi uma das primeiras empresas a fabricar perfis de alumínio em Portugal. Agora é uma empresa especializada em perfis de alumínio para quase todo o tipo de aplicações, desde caixilharia até peças de automóvel.

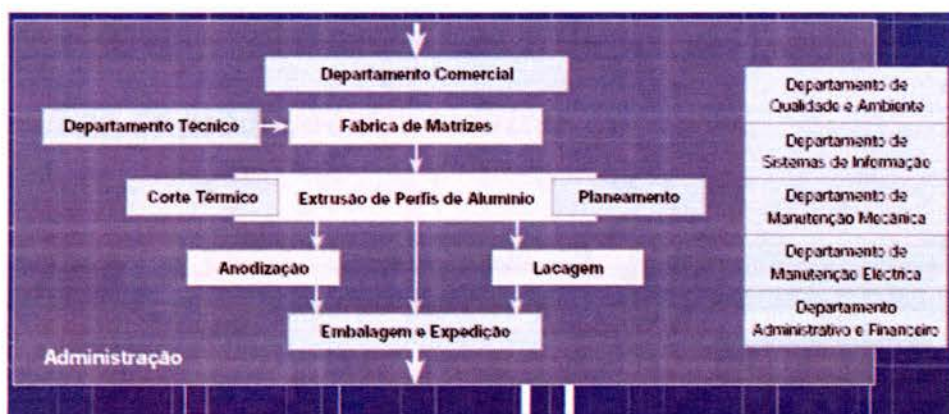
A fábrica começa a produção em 1972 e, ao mesmo tempo, abre um departamento técnico, responsável pela concepção, desenvolvimento e ensaio das matrizes. Desde esse momento a fábrica tem vindo a ampliar as instalações e melhorar as condições de trabalho (figura 1). Actualmente está dividida nos seguintes departamentos: o comercial, o técnico, a produção, o de qualidade e ambiente, os sistemas de informação, a manutenção mecânica e eléctrica, o administrativo e a fábrica de matrizes.



**Figura 1.** Evolução da fábrica ao longo dos anos (1981 - 2000) [1]

O desenvolvimento dum novo perfil de alumínio começa no departamento comercial, onde é feito um pedido para a secção técnica que posteriormente é enviado para a fábrica de matrizes com as respectivas características técnicas. A matriz depois de pronta segue para a área de produção de perfis para concluir o processo de fabrico. Os perfis vão para a zona dos tratamentos e são embalados e levados ao seu destino final, na figura 2 encontra-se o esquema do processo de fabrico dum perfil.[1]

A substituição das matrizes é frequente na produção no momento em que a matriz deixa de produzir correctamente, isto é, os perfis começam a apresentar defeitos. É sobre esta etapa do processo produtivo, que pode originar quebras acentuadas de produção, que incidiu este trabalho de estágio.



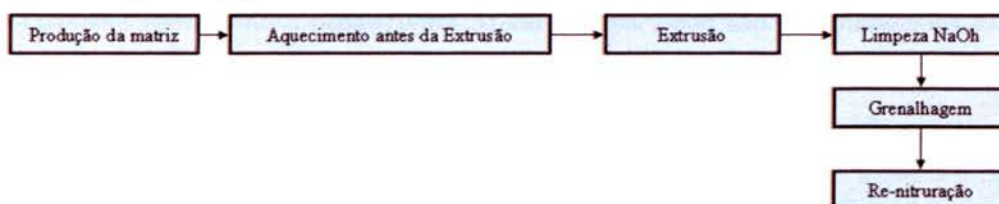
**Figura 2.** Esquema da produção de perfis, desde o pedido até à entrega.[1]

## 2. Objectivo

Este relatório tem como objectivo fornecer uma proposta à Extrusal S.A., através de análise de documentos e resultados obtido durante o estágio, de modo a aumentar a quantidade de perfil produzido por matriz. Na sequência do trabalho efectuado no âmbito da disciplina de Seminário, ficou acordado que esse aumento poderá ser obtido num perfil específico através do revestimento da matriz por técnicas de pulverização catódica.

## 3. Introdução

As matrizes como qualquer componente de uso fabril têm um ciclo de vida que está esquematizado na figura 3. [1]

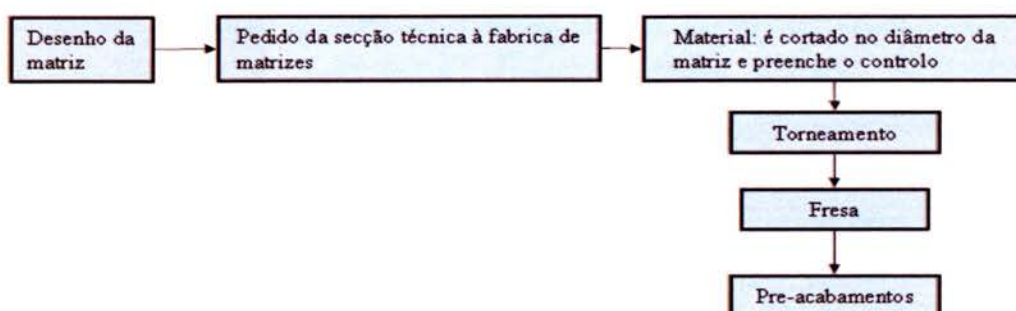


**Figura 3.** Ciclo de vida de uma matriz no processo de extrusão. [1]

A produção da matriz vai desde o desenho da mesma até à fase em que está pronta para entrar na zona de fabrico de perfis. Como este é um processo de extrusão a quente, as matrizes, antes de serem colocadas em serviço, têm que ser aquecidas até à temperatura em que se encontram as prensas (600°C). [1]

No fim da produção dum dado perfil, as matrizes são limpas com NaOH para retirar os excedentes de alumínio que soldaram à zona de atrito. [1]

### 3.1 Processo de produção das matrizes



**Figura 4.** Fluxograma de parte da produção de uma matriz. [1]

A fase inicial de produção consiste no desenho de uma matriz, caso seja uma peça nova, ou no envio de uma ordem de produção da secção técnica, que contém o número de referência do perfil da matriz, caso seja uma peça já existente. [1]

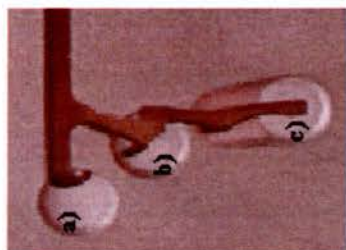
O desenho é feito com técnicas CAD CAM, contendo também a sequência de programas para a produção. [1]

A fase seguinte abrange o corte do material, seguido do torneamento. O material usado é aço H13.

Após a fase de torneamento a peça (figura 5) vai à fresa, onde são maquinadas as caixas de alimentação, nervuras e alturas (figura 6). Estas últimas tem como finalidade a diminuição do atrito no processo de extrusão, o que permite extrudir o perfil numa forma equilibrada. [1]

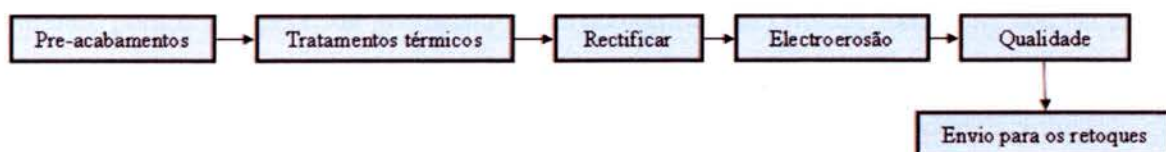


**Figura 5.** Uma matriz acabada de sair do torno [1]



**Figura 6.** Fotografia que indica as alturas: (a), (b) e (c) são as diferentes alturas duma matriz. [1]

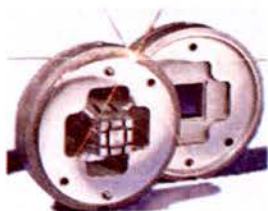
As fases seguintes da produção duma matriz estão representadas no fluxograma da figura 7. Depois dos pré-acabamentos, as matrizes são sujeitas aos tratamentos térmicos de têmpera e revenido. O tratamento de têmpera é feito em vácuo e é usado azoto como sistema de arrefecimento. Depois é feito um duplo revenido com temperaturas de 500 e 600°C. [1]



**Figura 7.** Fluxograma com a continuação da produção até que sai da secção. [1]

Em seguida, as matrizes voltam à fábrica de matrizes onde são rectificadas e seguem para a electroerosão, onde o perfil é aberto. Esta fase é a ultima devido às deformações que podem ocorrer durante os tratamentos térmicos (formação de martensite na têmpera, por ex.). [1]

Na figura 8 está representada uma matriz depois de aberta na electroerosão e quase pronta para ir para a prensa.



**Figura 8.** Matriz depois de aberta na electroerosão.

A fase seguinte é a de controlo de qualidade onde são encaixadas as matrizes macho e fêmea (caso sejam tubulares), são medidos todos os parâmetros determinantes para ver se as dimensões estão correctas. As matrizes podem eventualmente sofrer alguns desempenos nesta fase. [1]

De seguida é necessário retocar as matrizes, onde é retirado, por desbaste e polimento, o óxido (formado no processo de fabrico, e principalmente na electroerosão) e a sujidade que se encontra na superfície da matriz. [1]

Quando as superfícies estão completamente lisas e prontas para extrudir, são ensaiadas na prensa. Depois são nitruradas e no fim polidas outra vez (para retirar a camada branca da nitruração). Nesse momento estão prontas para extrudir o perfil ( a matriz com a zona do perfil utilizado neste relatório está representado na figura 9). [1]



**Figura 9.** Desenho da matriz utilizada neste trabalho [1]

No processo de extrusão toda a zona do perfil é sujeita a elevados esforços de atrito havendo, no entanto, pontos que pela sua geometria se apresentam como críticos. Esta zona precisa então de propriedades tribológicas<sup>1</sup> com as melhores características possíveis. Por isso, estas são submetidas a nitruração por banho de sais, embora agora exista a possibilidade da aplicação de revestimentos mais eficientes que podem ser aplicados por cima da camada nitrurada. [1, 3]

Neste trabalho, fez-se a análise da zona de atrito dum perfil utilizado na indústria e que é produzido em grandes quantidades (figura 9). Este caso é um bom exemplo para compreender a necessidade de aumentar a produção por matriz, porque:

- É um perfil de difícil produção, devido ao aparecimento de bandas e riscos.
- Os billetes produzidos por cada matriz variam de forma completamente aleatória, como se pode ser na tabela 1. Nesta tabela, o número indicado na primeira coluna é o número da matriz que produz o perfil, o segundo é as datas em que foram à prensa

---

<sup>1</sup> É a propriedade onde se relaciona o desgaste, o atrito e a lubrificação das superfícies em contacto. [2]

e o terceiro é quantos billetes foram extrudidos de cada vez. Na quarta está o total de billetes produzidos por cada matriz com uma nitruração.

- Cada vez que uma matriz falha, a prensa é obrigada a parar durante cerca de 20 minutos para trocar de matriz (se estiver tudo em ordem), o que causa uma diminuição de produção significativa.
- São aquecidas mais matrizes que as necessárias para extrudir, para o caso de alguma das matrizes falhar em serviço. [1]

**Tabela 1.** Análise de billetes produzidos por matriz com uma nitruração. [1]

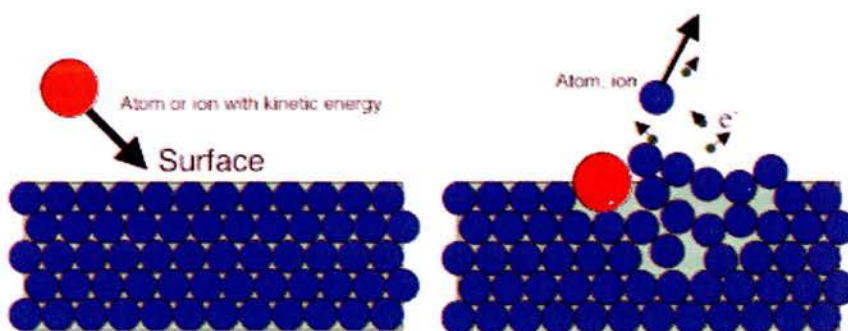
|                   |              | <i>Billetes extrudidos</i> |                 |
|-------------------|--------------|----------------------------|-----------------|
| <b>Matriz num</b> | <b>Datas</b> | <b>1 nitruração</b>        |                 |
| 22                | 30-Jun       | 3                          | 102             |
|                   | 11-Jul       | 99                         |                 |
| 23                | 22-Jun       | 3                          | 46              |
|                   | 30-Jun       | 15                         |                 |
|                   | 11-Jul       | 28                         |                 |
| 24                | 30-Jun       | 11                         | 20              |
|                   | 10-Jul       | 9                          |                 |
| 41                | 07-Jul       | 4                          | Risco           |
| 42                | 09-Jun       | 3                          | 37              |
|                   | 21-Jun       | 3                          |                 |
|                   | 29-Jun       | 4                          |                 |
|                   | 07-Jul       | 27                         |                 |
| 45                | 07-Jul       | 39                         | Está a nitrurar |
| 34                | 04-Jul       | 12                         | 31              |
|                   | 20-Jul       | 19                         |                 |
| 35                | 22-Jun       | 20                         | 133             |
|                   | 04-Jul       | 98                         |                 |
|                   | 20-Jul       | 15                         |                 |

### 3.2 Revestimentos por PVD

A deposição física em fase de vapor é feita através da vaporização de uma fonte sólida ou líquida em vácuo ou gases sobre baixa pressão que é depositada na superfície da ferramenta em questão. Existem vários métodos de deposição por PVD como o de pulverização catódica. [4, 5]

O processo de pulverização catódica é um tipo de PVD que permite grande versatilidade de materiais a revestir. Neste processo é necessário fornecer energia para excitar os átomos (ou iões), que vão bombardear a superfície do substrato, onde, por acção da colisão entram na malha (nesta fase não ocorre nenhum tipo de fusão). [5]

Na figura 10 está esquematizado o processo. [14]



**Figura 10.** Esquema do princípio básico do processo de pulverização catódica. [14]

Algumas das vantagens dos revestimentos por PVD são as seguintes:

- ✓ Melhor adesão do revestimento ao substrato, dado que é possível a limpeza e aquecimento antes do bombardeamento;
- ✓ Espessuras uniformes, porque as peças podem mover-se e rodar relativamente aos alvos;
- ✓ Evita a contaminação por hidrogénio, eliminando assim a fragilização do revestimento;
- ✓ Não há necessidade de polir ou maquinar no fim. Isto acontece porque o revestimento é muito fino e reproduz a forma superficial do substrato;
- ✓ Permite a realização de revestimentos duplex sem alterar as dimensões;
- ✓ É um processo de baixo custo. [4]

Devido a este processo ser de baixo custo tem vindo a ganhar espaço no mercado e com as vantagens acima indicadas pode-se dizer que dos processos de revestimento este é um dos mais aceites comercialmente hoje em dia. [4]

As propriedades destes revestimentos podem ser diversas, já que as composições e a variação dos ciclos de bombardeamentos dos alvos fazem variar a composição final. [4]

Na tabela 2, apresentam-se dois revestimentos comerciais que são indicados para o revestimento das matrizes e as suas propriedades conforme constam nas tabelas dos produtores. Os dois são revestimentos de TiAlN mas a composição e o tipo de PVD pelo qual são aplicados são diferentes.

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas de dois revestimentos comerciais. [6,7]

|                                | Dureza<br>HV0,05 | T° de<br>Serviço<br>Máxima | Coef. De<br>Atrito | Espessura<br>(µm) |
|--------------------------------|------------------|----------------------------|--------------------|-------------------|
| HardTiL<br>(TEANDM)            | 3300             | 850°C                      | 0,5-0,7            | 2 e 5             |
| Balanit<br>Micran<br>(BALZERS) | 3300             | 900°C                      | 0,3-0,35           | 1                 |

Estes revestimentos podem ser sobrepostos noutros revestimentos para melhorar ainda mais as propriedades do revestimento já obtido, isto é conhecido como revestimentos duplex. Existem varias combinações possíveis, desde metal sobre metal até misturas de compósitos, sendo o objectivo obter as propriedades tribológicas desejadas. [3]

O revestimento que foi analisado neste caso foi o TiAlN que foi aplicado a peças nitruradas. Este revestimento confere à peça revestida um aumento de resistência ao desgaste, de dureza, uma barreira química pouco reactiva (impede a difusão entre a peça e a ferramenta), e estabilidade térmica. Esta última característica é determinante na extensão dos tempos de vida em ferramentas onde a velocidade pode aumentar com a temperatura de produção ou nas quais é preciso garantir a manutenção da dureza (ex.: matrizes). [3]

## 4. Procedimento Experimental

A fase inicial deste trabalho consistiu em três etapas diferentes:

- Consultar o Instituto Pedro Nunes- IPN sobre as potencialidades de revestimento de peças nitruradas. Caracterização dos revestimentos produzidos.
- Revestir as mesmas peças em empresas comerciais.

Os vários testes realizados no IPN são de seguida caracterizados sumariamente.

#### ▪ **Análise Química**

Esta análise é feita com uma microsonda electrónica baseada na medição de raios-X característicos, emitidos por uma amostra sólida bombardeada por um feixe de electrões. De seguida foi feita uma análise espectral qualitativa e quantitativa. Nas análises quantitativas faz-se uma comparação com as composições dos elementos padrão que neste caso foram o Ti, B, O. [8, 9]

#### ▪ **Dureza Superficial**

Foram realizados dois tipos de testes de dureza, microdurezas e ultramicrodureza, que consiste num ensaio não destrutivo e permite a avaliação das propriedades mecânicas dos filmes. Este ensaio é feito por penetração e o valor é obtido através da medição de diferentes parâmetros como o tamanho da indentação. [10]

O teste de ultramicrodureza foi utilizado porque permite a avaliação dos filmes finos assentes sobre um substrato mas sem sofrer a influência do mesmo. Por isto, a indentação é de profundidade significativamente baixa. Sendo que a maior parte das indentações por este método são da ordem das centenas de nanómetros. [10]

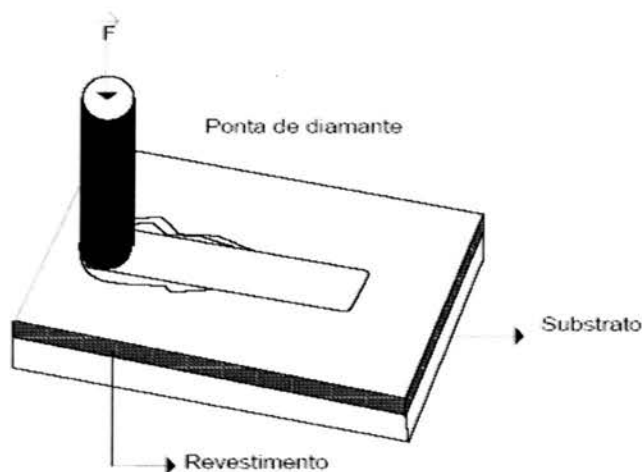
Os testes de dureza foram os dois Vickers, o de microdureza foi feito com uma carga de 50g e com 15 segundos de permanência máxima. O de ultramicrodureza foi com uma indentação máxima de 20mN em 60 degraus e com um tempo de permanência máxima em cada degrau de 0,5 segundos. Também teve dois patamares a carga constante de 30s, o primeiro a carga máxima e o segundo após descarga com a carga mínima. [9]

#### ▪ **Adesão do Revestimento**

Este teste é um teste empírico que determina a qualidade da ligação entre duas superfícies, neste caso entre o revestimento e o substrato. Consiste em riscar uma amostra com cargas crescentes mas a velocidade constante segundo uma direcção, na figura 11 está representado um esquema com o teste de adesão. As cargas são aplicadas através dum indentador cónico e são monitorizadas até ocorrer uma falha. [9]

Existem dois valores determinantes que são a carga crítica 1 ( $Lc1$ ) e a carga crítica 2 ( $Lc2$ ); sendo  $Lc1$  a força à qual começam a surgir os defeitos e  $Lc2$  a carga crítica a qual se dá a falha total de revestimento numa determinada zona. [9, 10]

A carga aplicada foi uma carga progressiva até 60N a uma velocidade de 10m/s e com uma taxa de aplicação de carga de 100N/m, a avaliação da adesão do filme foi feita por microscopia óptica. [9]



**Figura 11.** Esquema do ensaio de adesão. [10]

#### ▪ Avaliação da Espessura

A avaliação da espessura do revestimento foi feita por perfilometria, o que também permite medir a rugosidade do revestimento. Para isso utilizou-se um perfilómetro e os parâmetros de maior importância são:

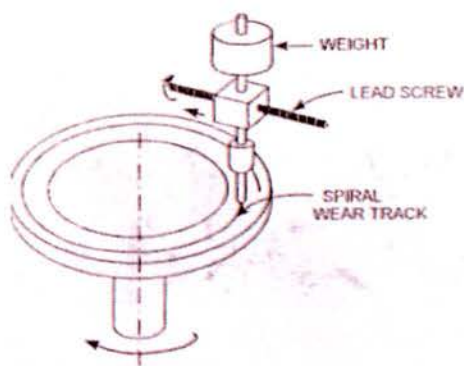
**Ra:** Rugosidade média - é a média aritmética dos valores absolutos do eixo das ordenadas;

**Rz:** Corresponde à média aritmética dos valores da rugosidade parcial;

**Rmax:** É dada pela diferença entre o ponto mais alto e o mais baixo no comprimento considerado. [11]

#### ▪ Ensaio de Desgaste

O ensaio é feito por desgaste abrasivo. As duas superfícies duras em contacto uma com a outra, na qual pelo menos uma das duas está em movimento. O ensaio efectuado foi o do pino-disco, que se encontra esquematizado na figura 12.



**Figura 12.** Esquema de funcionamento do ensaio de desgaste por pino-disco. [13]

Como o seu nome indica, tem um pino que está em contacto com um disco rotativo (qualquer dos dois pode ser o corpo de prova) ao qual se aplica um peso na parte superior. Isto permite que o pino faça uma trajectória circular a pressão constante. Neste ensaio a carga que foi aplicada foi de 10N, com um deslizamento linear de 200m e uma velocidade de 0,1m/s. O pino era uma esfera de aço DIN 100Cr6 de 10 mm. [11,12]

## 5. Resultados e análise dos resultados

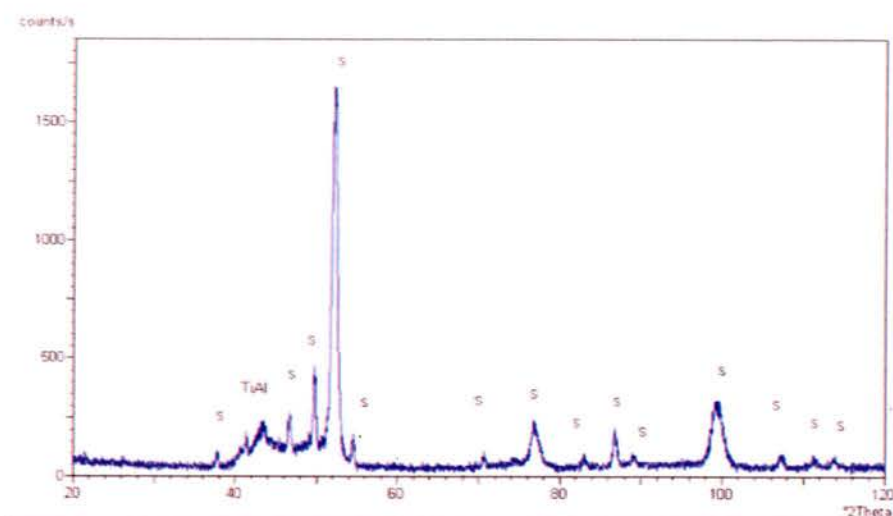
### 5.1 Análise química

**Tabela 3.** Composição química do revestimento (Ti,Al)N da amostra.

| Elementos           | Ti   | Al   | N    | O    |
|---------------------|------|------|------|------|
| Media (%at.)        | 46,8 | 11,8 | 37,6 | 3,4  |
| Desvio Padrão (%at) | 0,25 | 0,35 | 0,58 | 0,08 |

A análise química elementar encontra-se na tabela 3. Note-se que este revestimento tem a percentagem de titânio excedente, já que a soma deste com o alumínio devia dar um valor próximo ao azoto.

A figura 13 mostra o difractograma de raios-X correspondente ao filme do qual se obteve a composição química. Neste encontram-se vários picos que são o substrato indicados com a letra s e um pico de baixa intensidade mas largo que corresponde a fase de TiAl.



**Figura 13.** Difractograma de raios-X.

## 5.2 Dureza superficial

Ao fazer a análise geral dos resultados pode-se dizer que as peças revestidas com (Ti,Al)N apresentam melhores características que as apenas nitruradas, isto pode-se verificar na tabela 4, onde a dureza dos elementos das matrizes nitruradas é de 572 HV2 e a das revestidas é de 1488 HV0,5. Contudo é preciso ter em conta que estes valores de dureza não são os valores dos filmes mas sim da interacção entre o revestimento e o substrato. O valor da dureza do revestimento é obtido com uma profundidade na zona de indentação muito menor. O valor calculado pela ultramicrodureza, tabela 5, que é 29,9GPa (2990 HV) deve traduzir mais correctamente a dureza do revestimento.

**Tabela 4.** Microdurezas Vickers das amostras nitruradas e revestidas (nitruradas +(Ti,Al)N).

| Microdureza HV |                             |                        |
|----------------|-----------------------------|------------------------|
| Ensaio         | Peças Revestidas<br>(0,5 N) | Peças Nitruradas (2 N) |
| 1              | 1495                        | 544                    |
| 2              | 1448                        | 548                    |
| 3              | 1391                        | 567                    |
| 4              | 1513                        | 596                    |
| 5              | 1592                        | 605                    |
| Valor médio    | 1488                        | 572                    |
| Desvio Padrão  | 74,5                        | 27,6                   |

Na tabela 5 também está apresentado o valor do módulo de elasticidade que foi calculado (estimado) através do ensaio de ultramicrodureza recorrendo à curva de carga – descarga.

**Tabela 5.** Valores da ultramicrodureza e módulo de elasticidade das amostras revestidas.

| <i>Ensaio</i>        | <i>Ultramicrodureza (GPa)</i> | <i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i> |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1                    | 28,9                          | 242,2                               |
| 2                    | 27,8                          | 241,1                               |
| 3                    | 28,6                          | 229,4                               |
| 4                    | 30,7                          | 255,4                               |
| 5                    | 33,4                          | 252,2                               |
| <b>Valor médio</b>   | 29,9                          | 244,1                               |
| <b>Desvio Padrão</b> | 2,17                          | 10,3                                |

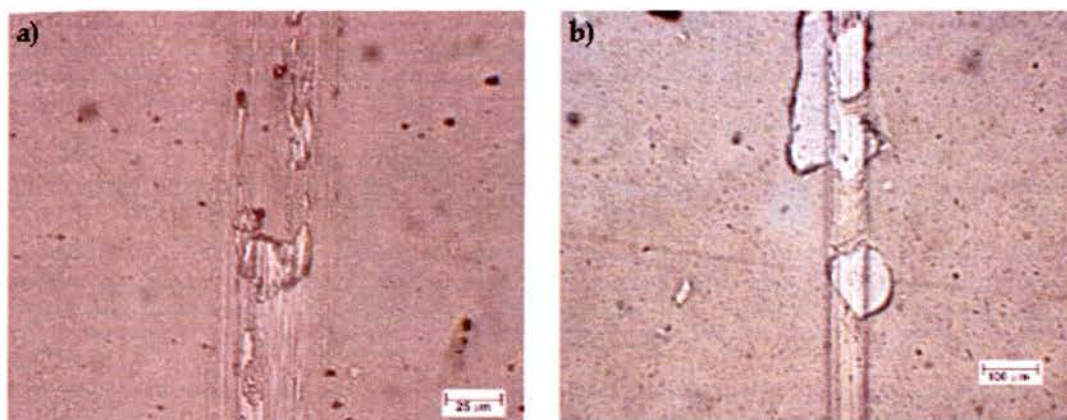
### 5.3 Adesão do Revestimento

A figura 14(a) apresenta o aspecto característico do revestimento associado à primeira carga crítica, Lc1. Nesta figura são visíveis as primeiras falhas do revestimento na zona onde a ponta de diamante passa. Os valores calculados estão apresentados na tabela 6. Os valores de Lc2 desta tabela, correspondem à segunda carga crítica que está relacionada com a figura 14(b), onde se notam as partes em que o revestimento já destacou deixando o substrato visível.

**Tabela 6.** Valores das cargas críticas de adesão.

| <i>Ensaio</i>        | <i>Carga crítica Lc1 (N)</i> | <i>Carga crítica Lc2 (N)</i> |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1                    | 18                           | 32                           |
| 2                    | 23                           | 34                           |
| 3                    | 20                           | 33                           |
| <b>Valor médio</b>   | 20,3                         | 33                           |
| <b>Desvio Padrão</b> | 2,52                         | 1                            |

Ao analisar-se atentamente estas micrografias nota-se que na zona superior da figura 14(b) existe uma falha com mais de 200 $\mu$ m de comprimento, enquanto que a falha da figura 14(a) mede no máximo 25  $\mu$ m. Da análise do valor da tabela 6 podemos concluir que este revestimento para valores abaixo de 20,3 N não corre risco de destacar.

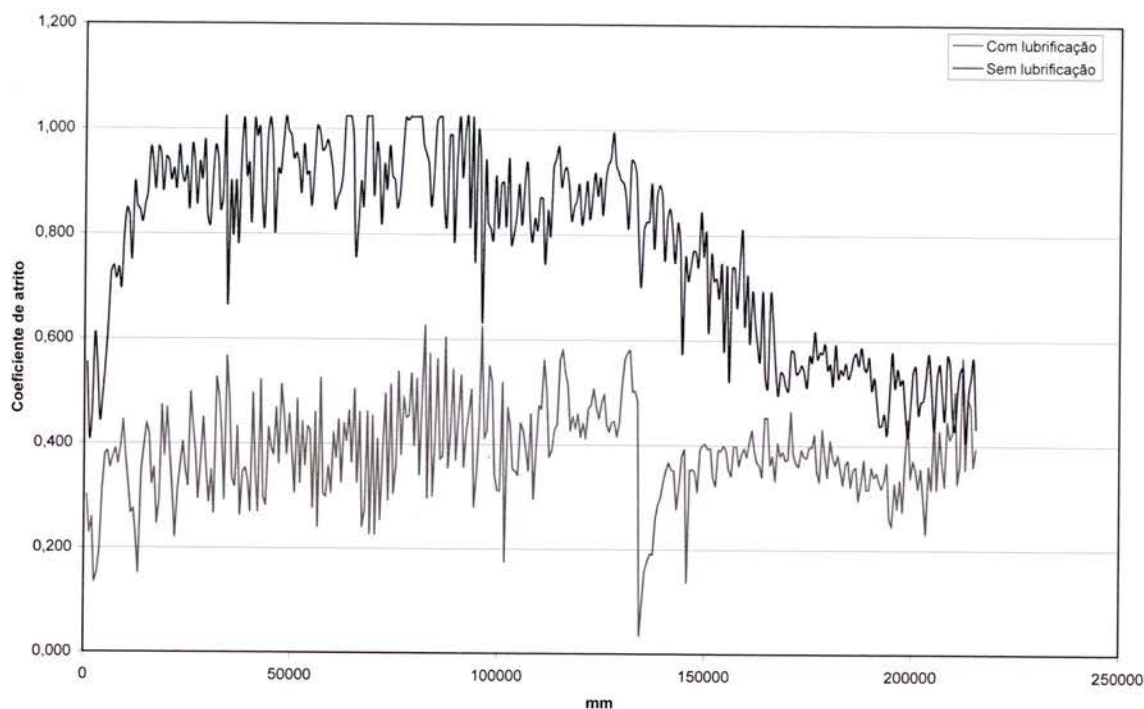


**Figura 14.** Microfotografia: (a) Correspondente à carga crítica 1; (b) correspondente à carga crítica 2.

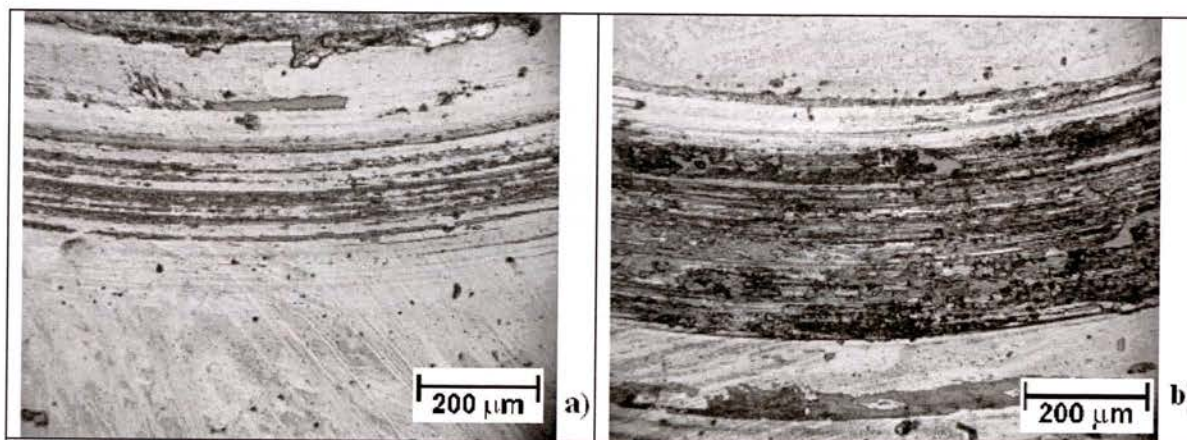
#### **5.4 Ensaio de Desgaste**

Os resultados do ensaio de desgaste estão apresentados na figura 15. O coeficiente de atrito máximo determinado é de 1,024 para um meio sem lubrificação e com um pino de aço DIN 100Cr6. Se o meio fosse lubrificado o valor descia para 0,627. É notório que o atrito é maior no ensaio sem lubrificação o que também está evidenciado na figura 16. O desgaste da superfície é muito mais evidente quando são testados sem lubrificação (figura 16(b)) do que com lubrificação (figura 16(a)). Neste último caso, são visíveis algumas pistas de passagem marcadas mas o revestimento na sua maior parte está ainda aderido ao substrato.

A curva sem lubrificação mostra um aumento do coeficiente de atrito desde 0,5 até 0,9 em 20m e aos 60m atinge o valor máximo, depois disso desce até abaixo dos 0,5 e estabiliza. Enquanto que a curva com lubrificação tem valores do coeficiente de atrito menores, começa nos 0,3, atinge o máximo que é 0,627 aos 82m e depois desce até estabilizar aos 0,3; com a perda de eficiência da lubrificação aumenta para valores por volta dos 0,4. Pode-se notar que as duas curvas tendem para o mesmo valor.



**Figura 15.** Gráfico com ensaio de desgaste do disco, com e sem lubrificação.

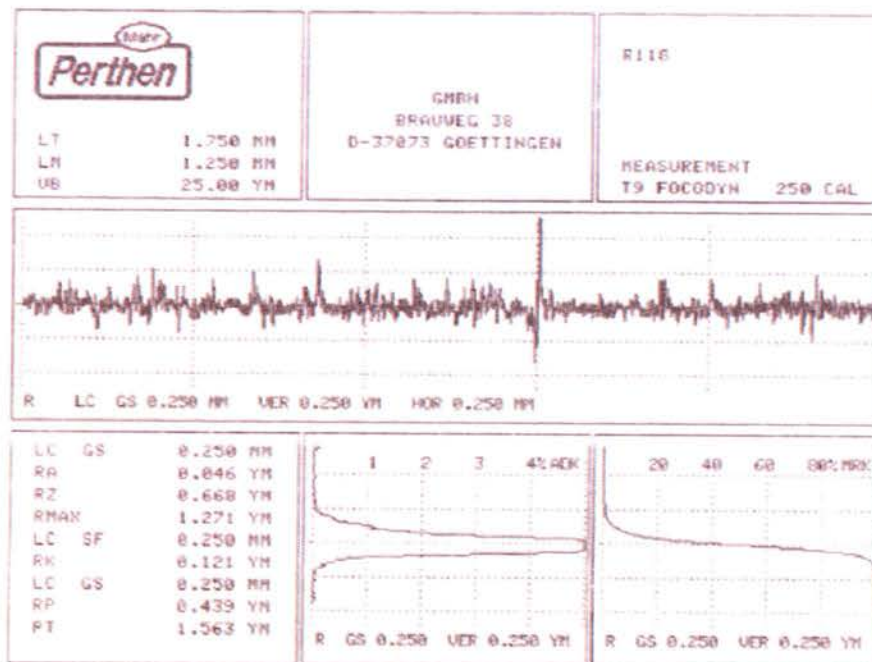


**Figura 16.** Esquema do desgaste provocado pelo pino no disco, com lubrificante (a) e sem lubrificante (b).

## 5.5 Rugosidade

A figura 17 indica o perfil da rugosidade. No gráfico do perfil cada linha guia do eixo dos yy equivale a  $0,25\mu\text{m}$  e isto permite determinar a espessura do revestimento e os valores já

tabelados na figura. Os valores mais importantes da figura são o Ra que é 0,046 $\mu$ m, Rz que é 0,668 $\mu$ m e o Rmax que é 1,271 $\mu$ m.



**Figura 17.** Perfil de rugosidade de uma das amostras.

A espessura do perfil foi determinada por perfilometria.

**Tabela 7.** Espessura do revestimento na amostra de controlo.

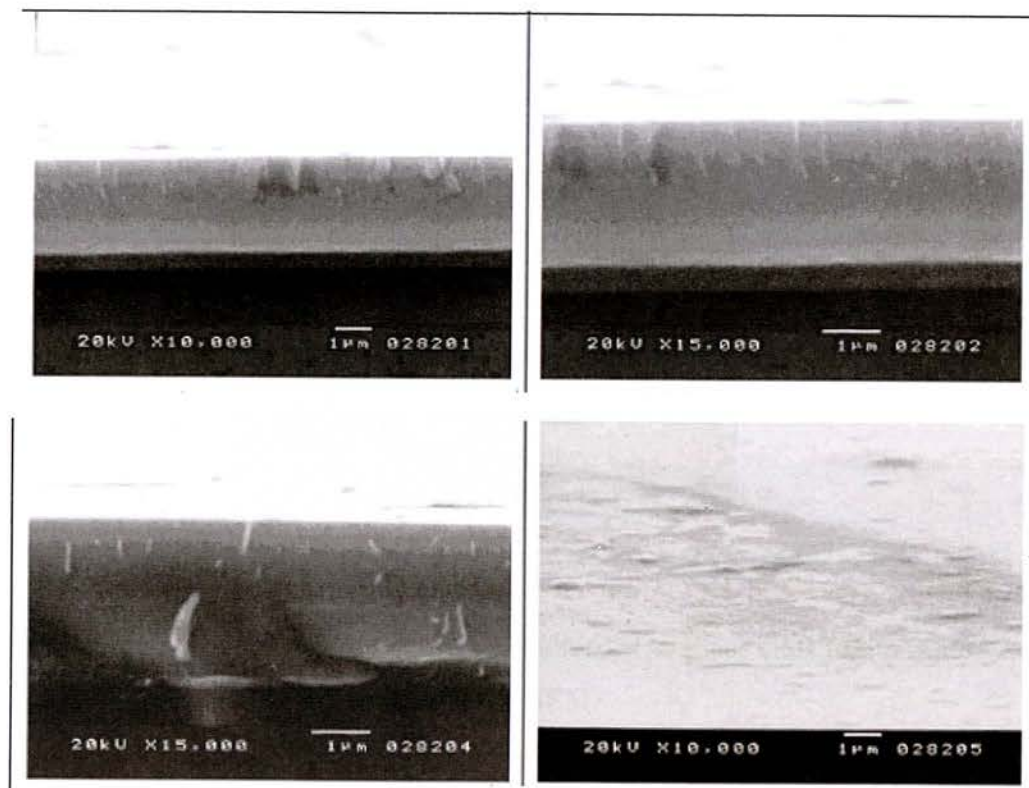
| Amostra          | Revestimento | Espessura ( $\mu$ m) |
|------------------|--------------|----------------------|
| Chapa de Silício | TiAlN        | 5,6                  |

## 5.6 Morfologia do Revestimento (SEM)

A análise da morfologia do revestimento fez-se na amostra de controlo e nas zonas críticas, isto é, nos sítios onde o revestimento está mais susceptível a fracturar ou ser danificado devido ao desgaste.

- **Amostra de controle<sup>3</sup>**

Na figura 18 estão vários detalhes da secção transversal, nota-se que é um revestimento compacto, sem morfologia característica mas pode-se notar na figura 19 uma tendência para crescimento colunar.



**Figura 18.** Morfologia do revestimento na amostra de controle.

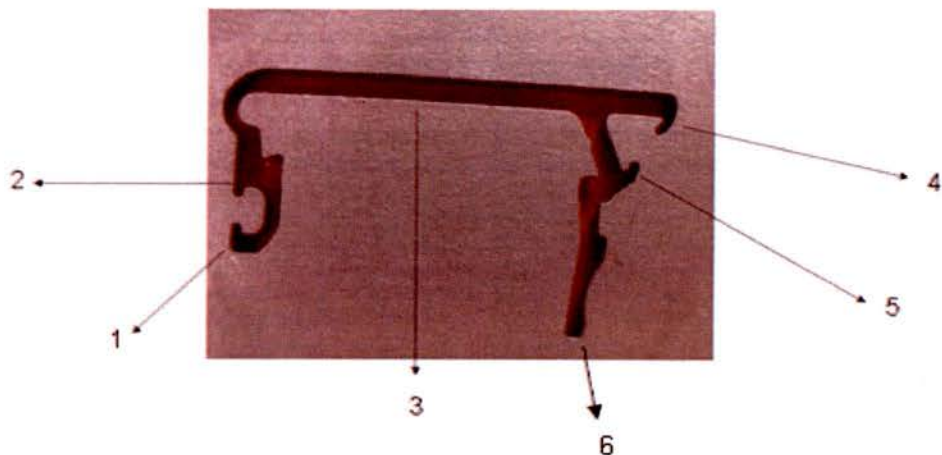


**Figura 19.** Crescimento colunar do revestimento na amostra de controle

<sup>3</sup> É uma amostra de silício para revestir. Serve para uso do laboratório e pode ser utilizada para verificar os parâmetros usados.

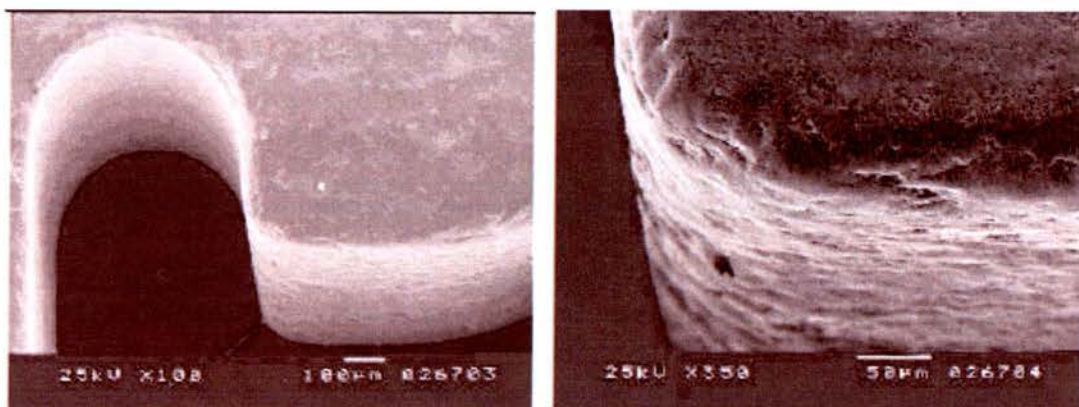
- **Sem revestimento de TiAlN.**

Como o revestimento de TiAlN é um revestimento fino, normalmente segue a morfologia da superfície em que é colocado, pelo que é necessário fazer uma análise ao acabamento da superfície antes de revestir. Para esta análise tiraram-se fotografias em pormenor dos pontos críticos da zona de atrito que estão assinalados na figura 20.



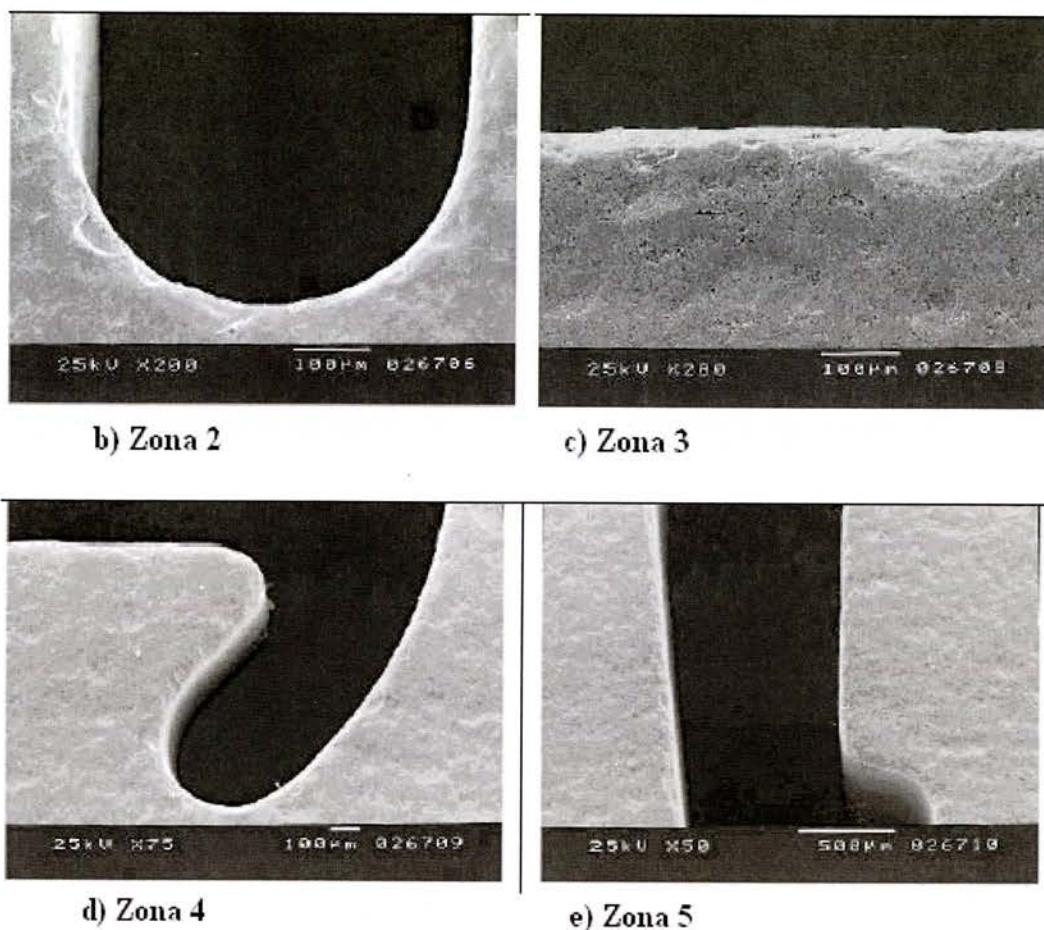
**Figura 20.** Uma placa revestida em que são indicadas as zonas onde foram tiradas as fotografias no SEM.

A morfologia das zonas críticas está ilustrada nas figuras 21 e 22 com as respectivas zonas indicadas na parte inferior. Esta é importante para avaliar por comparação a qualidade do revestimento e, por conseguinte, estimar o comportamento deste em serviço.



**a) Zona 1**

**Figura 21.** Micrografias da zona 1 da figura 20 em amostras apenas nitruradas

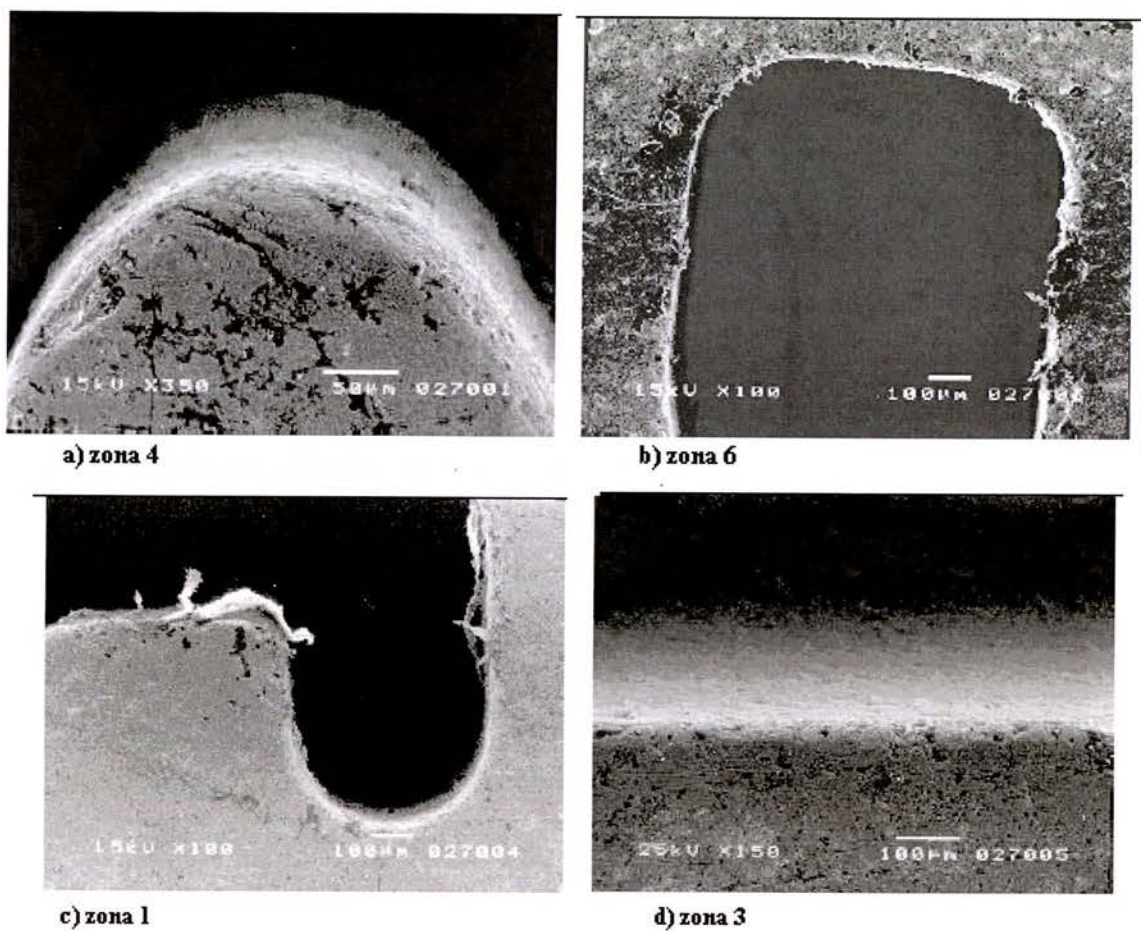


**Figura 22.** Micrografias das zonas 1, 2, 3, 4 e 5 da figura 20 em amostras apenas nitruradas.

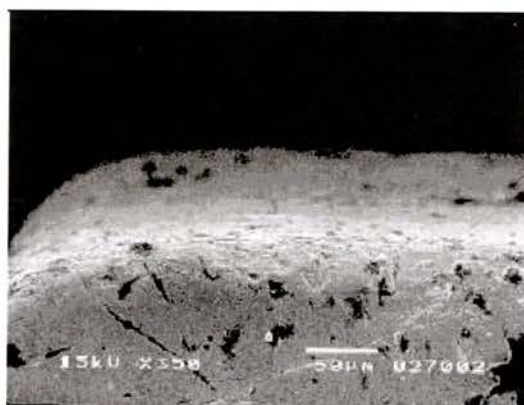
- **Com o revestimento de TiAlN**

A zona marcada com o número 4 da figura 20 é uma zona que pode apresentar falhas ao ser revestida devido à forma em que termina ser muito estreita. Mas se observamos a micrografias das figuras 23 e 24 podemos observar que o revestimento está homogêneo e com boa adesão.

A zona 3 da figura 23, também é importante porque é a zona visível do perfil. Se houver riscos ou bandas nesta zona isso é suficiente para esta matriz deixar de produzir. Na figura 23(b) mostra-se a zona 6, onde está a morfologia da ponta da zona de atrito; a figura 23(c) (zona 1) apresenta uma zona que é crítica devido a ser sujeita a um maior esforço na ponta.



**Figura 23.** Micrografias tiradas no SEM das zonas 1, 3, 4, 6 da figura 20



**Figura 24.** Micrografia tirada no SEM sem zona determinada.

## 6. Conclusão

Se fizemos uma comparação entre as propriedades mecânicas que foram obtidas por pesquisa no seminário (tabela 9) e as do revestimento do IPN (tabela 8), nota-se que o valor da dureza do revestimento do IPN é mais baixo que o esperado. Na tabela 9 o valor é de 2300 para uma carga de 2,5N e na tabela 8 a dureza é de 1488 para uma carga de 0,5N. Também pode-se ver que os valores para as cargas críticas são mais baixas. O Lc1 e o Lc2 na tabela 9 são 32 e 47 respectivamente e na tabela 8 são 20,4 e 33. Isto pode ser devido à composição química obtida, já que o valor do titânio, por exemplo, excede o esperado.

**Tabela 8.** Propriedades mecânicas do revestimento de TiAlN produzido pelo IPN.

| Propriedades do Revestimento |                        |            |     |                              |       |                              |
|------------------------------|------------------------|------------|-----|------------------------------|-------|------------------------------|
| Dureza                       |                        | Adesão (N) |     | Rugosidade ( $\mu\text{m}$ ) |       | Modulo de elasticidade (GPa) |
| Microdureza (HV)             | Ultramicrodureza (GPa) | Lc1        | Lc2 | Ra                           | Rz    |                              |
| 1488                         | 29,88                  | 20,4       | 33  | 0,046                        | 0,668 | 244,1                        |

**Tabela 9.** Propriedades mecânicas de alguns revestimentos e do aço H13. [5]

|                                     | H13      | TiN       | CrN       | (TiAlN)   | TiB <sub>2</sub> |
|-------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| Surface hardness* (HV)              | 545 ± 15 | 2490 ± 80 | 1410 ± 90 | 2300 ± 80 | 4000 ± 160       |
| Coating thickness ( $\mu\text{m}$ ) | —        | 5,4 ± 0,3 | 4,2 ± 0,1 | 4,4 ± 0,1 | 3,0 ± 0,2        |
| Surface roughness (nm)              | 12 ± 4   | 21 ± 2    | 37 ± 4    | 41 ± 2    | 12 ± 1           |
| Residual stress (GPa)               | —        | -2,4      | -3,2      | -4,3      | -0,5             |
| Critical load (N)                   | —        | —         | —         | —         | —                |
| (c.f.)                              | —        | 32 ± 4    | 15 ± 1    | 32 ± 4    | 14 ± 1           |
| (c.b.)                              | —        | 57 ± 4    | 27 ± 5    | 47 ± 2    | 28 ± 2           |
| Critical load <sup>b</sup> (N)      | —        | —         | —         | —         | —                |
| (c.f.)                              | —        | 33 ± 5    | 18 ± 4    | 30 ± 4    | 2 ± 2            |
| (c.b.)                              | —        | 60 ± 5    | 29 ± 6    | 45 ± 4    | 2 ± 2            |

\* Measured with 500 gf for H13 and 25 gf load for the coatings.

<sup>b</sup> Obtained after NaOH treatment.

Contudo este trabalho ainda não está terminado, faltando o teste em serviço e a caracterização dos revestimentos produzidos na TEANDM. Em termos gerais este revestimento têm possibilidades de bom funcionamento na prensa e de um aumento de produção, porque:

- Tem uma dureza maior que as matrizes só nitruradas e o módulo de elasticidade dá um campo de deformação elástica razoável (deformação sem afectar a qualidade de revestimento).
  - Numa análise comparativa das microdurezas obtidas entre as nitruradas e as nitruradas + TiAlN, podemos dizer que como o valor da primeira é de 572 HV e da segunda é 1488 HV, a produção “deverá” triplicar quando forem a extrudir numa prensa.
- Têm valores razoáveis de atrito e considerando as características do ensaio, no processo de produção este vai estar sujeito a condições menos extremas.
- A adesão do revestimento à peça é bastante boa, pelo que não se corre o risco de haver perda de qualidade por falha do revestimento.
- Tem uma rugosidade típica para estes revestimentos ( $R_a 0,046\mu m$ ).
- Não tem uma morfologia característica, pelo que não está sujeito a degradação superficial e ao aparecimento de falhas prematura devido a morfologia.
- Finalmente, convém fazer-se referência ao tipo de acabamento da zona de atrito, já que este é um revestimento fino e segue a morfologia da superfície em que é colocado. Assim na figura 23 são notórios os defeitos e se olharmos com atenção para a figura 23(d) (zona visível do perfil) notamos que o perfil que poderia ser extrudido por nestas condições ia provavelmente ter riscos na fase inicial ou mesmo ter defeitos.

## 7. Bibliografia

- [1] Dados fornecidos pela Extrusal
- [2] Definição de tribologia, <http://es.wikipedia.org/wiki/Tribolog%C3%ADa>, 29/08/2006
- [3] MHStaia, M D'Alessandria1, D T Quinto, F Roudet, MMarsal Astort, High-temperature tribological characterization of commercial TiAlN coatings, Institute of Physics Publishing, 24/06/2006
- [4] <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/3548/18/ii-indice.pdf> -, Revestimentos multicamadas, 13/09/2006
- [5] Victoria Fernandez, Relatório de seminário, 2005/2006
- [6][http://www.oerlikon.com/ecomaXL/index.php?site=COATING\\_SERVICES\\_EN\\_home](http://www.oerlikon.com/ecomaXL/index.php?site=COATING_SERVICES_EN_home), Site da Balzers, 13/06/2006
- [7] <http://www.teandm.pt/>, Site da TEANDM, 12/09/2006
- [8] <http://www.uned.es/cristamine/mineral/metodos/sem.htm>
- [9] Eng. Ana Manaia, Relatório do IPN, 2006
- [10] <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/3543>
- [11][http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem\\_outros/cursoprofissionalizante/tc2000/metrologia/aula19.pdf#search=%22rugosidade%20rz%22](http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursoprofissionalizante/tc2000/metrologia/aula19.pdf#search=%22rugosidade%20rz%22), Analise sobre a rugosidade, 12/09/2006
- [12] Pin-on-disk testing, <http://www.micromaterials.co.uk/Pin-on-Disk...htm>
- [13] Albertin, Eduardo, Desgaste Abrasivo, Instituto de Pesquisas Tecnologias SP, [www.abmbrasil.com.br/cim/download/Eduardo\\_Albertin.pps](http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/Eduardo_Albertin.pps), 10/09/2006
- [14] <http://www.pvd-coatings.co.uk/theory-of-pvd-coatings-magnetron-sputtering.htm>, PVD coatings, 13/09/2006
- [15] C. S. Abreu, F. J. Oliveira, M. Belmonte, A. J. S. Fernandes, R. F. Silva, J. R. Gomes, Revestimentos de Diamante CVD em Si3N4: Atrito e Desgaste no Deslizamento de pares próprios sem lubrificação, 2002

## 8. Anexo



### PROPOSTA DE SERVIÇOS DE PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE FILMES FINOS PRODUZIDOS POR PULVERIZAÇÃO CATÓDICA

Enquadramento: Esta proposta é realização para quantificar os valores associados à produção, caracterização e análise de falha de revestimentos finos produzidos pela técnica de PVD na Unidade de Modificação de Superfícies do Instituto Pedro Nunes, no âmbito de trabalho de desenvolvimento e teste de solução de revestimento a serem aplicadas em matrizes de extrusão de alumínio que serão testadas pela empresa EXTRUSAL no decurso de Estágio Profissional que aí decorre.

#### Descrição do trabalho

**1** - Produção de 3 tipos de revestimentos baseados em sistemas já desenvolvidos (WTiN- 2 tipos, TiAlN), tendo em vista a sua optimização para a aplicação em causa. Caracterização das suas propriedades sobre o substrato em utilização na empresa. Revestimento de peças para ensaios industriais. Testes a cargo do estagiário/empresa. Análise das causa de falha após fim de vida do componente.

**Custo** - 2.000 € (dois mil euros) + IVA

**2** - Produção de 2 tipos de revestimentos baseados em sistemas já desenvolvidos (WTiN, TiAlN), tendo em vista a sua optimização para a aplicação em causa. Caracterização das suas propriedades sobre o substrato em utilização na empresa. Revestimento de peças para ensaios industriais. Testes a cargo do estagiário/empresa. Análise das causa de falha após fim de vida do componente.

**Custo** - 1.500 € (mil e quinhentos euros) + IVA

**3** - Produção de um tipo de revestimento baseado em sistemas TiAlN, tendo em vista a sua optimização para a aplicação em causa. Caracterização das suas propriedades sobre o substrato em utilização na empresa. Revestimento de peças para ensaios industriais. Testes a cargo do estagiário/empresa. Análise das causa de falha após fim de vida do componente.

**Custo** - 1.000 € (mil euros) + IVA

**4** - Caracterização das seguintes propriedades:

- dureza superficial (ultramicrodureza),
- adesão do revestimento (scratch test),
- espessura (perfilometria laser ou mecânica,
- avaliação da rugosidade
- verificação da morfologia (SEM) e arranjo estrutural (DRX)
- ensaio tribológicos (SRV ou pino-disco)

**Custo** – Um Revestimento - 500 € (quinhentos euros) + IVA  
**Custo** – Dois Revestimentos - 800 € (oitocentos euros) + IVA  
**Custo** – Três Revestimentos - 1000 € (mil euros) + IVA

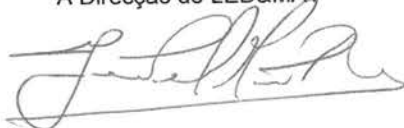
**Período de execução**

De acordo com o plano de trabalho do estágio e em consonância com a disponibilidade de equipamento de deposição.

**Condições de pagamento**

50% no início do projecto, 50% no final do estágio

A Direcção do LED&MAT



João Paulo Mouta Dias



FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000105303