



## Melhoria do desempenho de ferramentas para estampagem de folha flandres

LILIANA PATRÍCIA BASTOS FERNANDES

dezembro de 2018

# MELHORIA DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS PARA ESTAMPAGEM DE FOLHA FLANDRES

Liliana Patrícia Bastos Fernandes

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica

POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

## MELHORIA DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS PARA ESTAMPAGEM DE FOLHA FLANDRES

Liliana Patrícia Bastos Fernandes

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica.

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Orientador**

Doutor Francisco José Gomes da Silva  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Arguente**

Doutor Filipe José Alves de Oliveira  
Investigador Principal, Universidade Aveiro



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu profundo e reconhecido agradecimento a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho. Devo, no entanto, salientar algumas individualidades e instituições, pela importância da sua colaboração:

- Ao Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva pela sua orientação rigorosa e dedicada, total disponibilidade, pelos conselhos e críticas e sobretudo pela amizade.
- Ao Engenheiro Carlos Rodrigues, por ter lançado este enorme desafio e ter acedido ser meu tutor na empresa, pelo incentivo e apoio para o sucesso deste projecto.
- Ao Engenheiro Ricardo Alexandre pela sua abertura e partilha de conhecimento, bem como à TEandM na sua colaboração, fornecendo todos os revestimentos necessários para dar seguimento a este estudo.
- À Colep, pela sua colaboração e a oportunidade que me deu para desenvolver este projecto, fornecendo todas as amostras e materiais.
- Ao Dr. Rui Rocha (CEMUP), pela sua ajuda e espírito crítico nas análises SEM.
- À Engenheira Fátima Andrade, pelo seu apoio e ajuda nos testes de laboratório no ISEP.
- Ao Professor Doutor António Paulo Monteiro Batista e Professor Doutor Jorge Seabra, pelo seu apoio e permissão para acesso aos laboratórios do INEGI.
- E a todos que, de uma forma directa ou indirecta, contribuíram para que a realização deste projecto fosse possível.



Ao meu pai



## PALAVRAS CHAVE

Folha Flandres, Revestimentos Finos, Deposição física em fase de vapor (PVD), Estampagem, Desgaste mecânico, Coeficiente atrito

## RESUMO

Uma prestigiada marca Portuguesa comercializa uma gama de biscoitos “premium”, usando geralmente uma embalagem metálica com características especiais - *design* perfeito, apelativa ao olhar e por vezes, peça de coleção. Por outro lado, a embalagem garante também a proteção do produto que vai no seu interior, evitando que os biscoitos sofram quebras ou danos durante as operações de logística. Estas embalagens são fabricadas em folha-flandres revestidas com uma camada de estanho ( $2,8 \text{ g/m}^2$ ), sem qualquer outro revestimento com verniz na face interior, o que origina problemas graves de desgaste nas ferramentas de estampagem, tanto na matriz como no punção, durante o processo de estampagem, os quais estão relacionados com a transferência de estanho durante o processo de conformação. Devido ao facto de o estanho ser caracteristicamente macio, este adere facilmente à ferramenta, gerando desgaste prematuro da mesma, e algumas preocupações para que se mantenha a requerida geometria final do tampo, para além das conseqüentes perdas de produtividade. Fazer recurso a lubrificante seria uma forma fácil de resolver os problemas acima descritos, mas a lubrificação deve ser evitada, uma vez que estas embalagens “premium” se destinam a fins alimentares.

Depois de identificados os mecanismos de desgaste, foram seleccionados cinco revestimentos PVD (CrCN, WC,  $\text{B}_4\text{C}$ , Mo e TiAlN), testando o comportamento ao desgaste da ferramenta dos mesmos em laboratório e nas condições habituais de trabalho. A transferência de estanho da folha para a ferramenta foi também estudada, bem como o coeficiente de atrito da folha contra os revestimentos seleccionados.

Os resultados obtidos com alguns revestimentos testados permitem confirmar que é possível minimizar a transferência de estanho da folha para a ferramenta de estampagem, assegurando um ciclo de vida mais longo destas partes, diminuição das operações de manutenção da ferramenta, e melhoria da eficiência geral do equipamento (OEE) deste processo de estampagem. Observou-se que o filme de TiAlN apresentou um excelente comportamento tribológico em regime seco, tanto nos testes laboratoriais como nos testes desenvolvidos no processo industrial. Verificou-se a ausência de transferência de estanho da folha para a superfície da ferramenta revestida, possibilitando desta forma o desenvolvimento do processo sem recurso a lubrificantes.



**KEYWORDS**

*Tinplate, Thin Films, Physical Vapour Deposition (PVD), Stamping, Wear Behavior, Friction*

**ABSTRACT**

A prestigious Portuguese brand markets a range of "premium" biscuits, usually using a metallic packaging with special characteristics - perfect design, appealing to look and sometimes a collection piece. On the other hand, the packaging also ensures the protection of the product inside, preventing the cookies from suffering breakage or damage during logistics operations. These packagings are made of tinplate ( $2.8 \text{ g / m}^2$ ), coated with tin ( $2,8 \text{ g / m}^2$ ), without any other lacquer coating on the inner side, which causes serious wear problems in the stamping tools, both in the matrix as in the punch, during the stamping process, which are related to the transfer of tin during the forming process. Due to the fact that the tin is characteristically soft, it adheres easily to the tool, causing premature wear of the tool, and some concerns to maintain the required final geometry of the top, in addition to the consequent productivity losses. Making use of lubricant would be an easy way to solve the problems described above, but lubrication should be avoided, since these "premium" packages are intended for food purposes.

After the wear mechanisms have been identified, five PVD coatings (CrCN, WC,  $\text{B}_4\text{C}$ , Mo and TiAlN) were selected, testing the wear behavior of the tool in the laboratory and in the usual working conditions. The transfer of tin from the sheet to the tool was also studied, as well as the coefficient of friction of the sheet against the selected coatings.

The results obtained with some of the coatings tested confirm that it is possible to minimize the transfer of tin from the sheet to the stamping tool, ensuring a longer life cycle of these parts, reduction of tool maintenance operations, and improvement of overall equipment efficiency (OEE) of this stamping process. It was observed that TiAlN film presented an excellent tribological behavior in dry conditions, both in laboratory tests and in industrial process. It was found that no tin transfer from tinplate to tool surface occurred, thus enabling process development without the use of lubricants.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

MOCVD	<i>Metalorganic Chemical Vapour Deposition</i>
HFCVD	<i>Hot-Filament Chemical Vapour Deposition</i>
MCD	<i>Micro-Crystalline Diamond</i>
NCD	<i>Nano-Crystalline Diamond</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
AFM	<i>Atomic Force Microscopy</i>
CEMUP	Centro de Materiais da Universidade do Porto
CrCN	Carbonitreto de Crómio
EDM	Electrical discharge machining
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
EDX	<i>Energy Dispersive X-Ray Analysis</i>
FEUP	Faculdade de engenharia da Universidade do Porto
FF	Folha Flandres
HCVD	<i>Hot-filament Vapour Deposition Technique</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
OEE	<i>Overall Equipment Efficiency</i>
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i>
CVD	<i>Chemical Vapour Depositon</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>

### Lista de Unidades

GPa	Giga Pascal
MPa	Mega Pascal
min	Minuto
mm	Milímetro
g/m <sup>2</sup>	Grama por metro quadrado
N/mm <sup>2</sup>	Newton por milímetro quadrado
s	Segundo
µm	Micrómetro
°C	Graus Celsius

### Lista de Símbolos

B <sub>4</sub> C	Carboneto de Boro
Mo	Símbolo químico para o Molibdénio

---

WC	Carboneto de Tungstênio
TiAlN	Nitreto Titânio Alumínio
%	Porcentagem
R <sub>p</sub>	Tensão cedência
R <sub>m</sub>	Tensão máxima
r <sub>cm</sub>	Raio concordância da matriz
r <sub>cp</sub>	Raio concordância do punção
R <sub>a</sub>	Rugosidade média aritmética
R <sub>q</sub>	Rugosidade média quadrática
R <sub>máx</sub>	Rugosidade máxima
l <sub>m</sub>	Comprimento total medição rugosidade
l <sub>e</sub>	Comprimento unitário de medição de rugosidade
Zi	Rugosidade parcial

---

## GLOSSÁRIO DE TERMOS

---

Coil	Rolo de Folha-de-flandres
Software	Conjunto de programas ou processos relacionados com funcionamento de um conjunto de tratamento de informação em computadores.

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – BOBINA DE FOLHA-DE-FLANDES [4]	9
FIGURA 2 – DIFERENTES CAMADAS QUE CONSTITUEM A FOLHA-DE-FLANDRES (VISTA EM CORTE) [5]	10
FIGURA 3 – REGIÕES DO COPO SOB ESTAMPAGEM [8]	15
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO DO CORTE DE UMA CHAPA [9]	16
FIGURA 5 – ESTRUTURA DE UMA FERRAMENTA DE ESTAMPAGEM [10]	16
FIGURA 6 – A) PLACA DE CHOQUE INTEIRA; B) PLACA DE CHOQUE SEGMENTADA [11]	17
FIGURA 7 – EXEMPLO FERRAMENTA PORTA-PUNÇÃO [11]	18
FIGURA 8 – TIPOS DE ARESTAS DE CORTE DO PUNÇÃO [11]	18
FIGURA 9 – ESQUEMA LOCALIZAÇÃO DA PLACA GUIA: 1 – ABERTURA PARA PASSAGEM DA CHAPA, 2 – RÉGUA, 3 – MATRIZ, 4 – PLACA GUIA, 5 – BASE INFERIOR [11]	19
FIGURA 10 – ESQUEMA DAS GUIAS DA CHAPA E SUAS DIMENSÕES: 1 – PLACA DE GUIA, 2 – MATRIZ, 3 – BASE, 4 – GUIAS DA CHAPA [11]	20
FIGURA 11 – A) FERRAMENTA DE SIMPLES EFEITO, B) FERRAMENTA DE DUPLO EFEITO, C) FERRAMENTA DE TRIPLO EFEITO [12]	21
FIGURA 12 – EXEMPLO FERRAMENTA GUIADA POR PLACA DE GUIA OU EXTRATOR FIXO 1 – MATRIZ ; 2 – PUNÇÃO; 3 – EXTRATOR [10]	22
FIGURA 13 – CONJUNTO BASE SUPERIOR - INFERIOR NORMALIZADO (COLUNAS GUIA) [10]	22
FIGURA 14 – COLUNAS GUIA: A)BUCHAS DE ESFERAS; B) BUCHAS DESLIZANTES [10]	23
FIGURA 15 – A) EXTRACTORES ELÁSTICOS; B) DESENHO FERRAMENTA COM EXTRACTOR ELÁSTICO: 1 – BASE SUPERIOR, 2 – PLACA PORTA-PUNÇÃO, 3 – EXTRACTOR ELÁSTICO, 4 – BASE INFERIOR [10]	23
FIGURA 16 – GEOMETRIA POSSÍVEIS DAS MOLAS: A) MOLA QUADRADA, B) MOLA CIRCULAR,	23
FIGURA 17 – EXEMPLO DE UMA FERRAMENTA PROGRESSIVA E OS SEUS PRODUTOS [10]	24
FIGURA 18 – EXEMPLO DE FERRAMENTA COMBINADA: 1 – PUNÇÃO MÓVEL, 2 – EJECTOR, 3 – MATRIZ, 4 – EXTRACTOR ELÁSTICO, 5 – PUNÇÃO FIXO [10]	25
FIGURA 19 – EFEITO DA FOLGA NA SUPERFÍCIE DA CHAPA CORTADA [9]	26
FIGURA 20 - REPRESENTAÇÃO DA FOLGA ENTRE O PUNÇÃO E A MATRIZ [9]	27
FIGURA 21 – DETERMINAÇÃO DA FOLGA ENTRE A MATRIZ E O PUNÇÃO EM FUNÇÃO DA ESPESURA E DO MATERIAL [10]	28
FIGURA 22 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO AFM [30]	38
FIGURA 23 – CLASSES DE QUALIDADE DA ADESÃO DE ACORDO COM A NORMA VDI 3198:1991 [43]	40
FIGURA 24 - INSTALAÇÕES DA COLEP PORTUGAL	43
FIGURA 25 - INSTALAÇÃO DA COLEP NO MUNDO [46]	43
FIGURA 26 – CRONOGRAMA HISTÓRICO DA COLEP [46]	44
FIGURA 27 – EMBALAGEM METÁLICA DE BOLACHAS	45
FIGURA 28 - DESENHO DE CONJUNTO DA FERRAMENTA DE ESTAMPAGEM	46
FIGURA 29 – BANDAS DE LÜDERS FORMADAS NUM PROVETE TRACIONADO	51
FIGURA 30 - SECÇÃO TRANSVERSAL DA OBSERVAÇÃO DA FF	51

FIGURA 31 - PORMENOR DA SECÇÃO TRANSVERSAL DA SUPERFÍCIE DA FF – ESPESSURA DO ESTANHO	51
FIGURA 32 – ESPECTROS DAS ZONAS Z1, Z2 E Z3 DA FIGURA 31, RELATIVA À FF DA ARCELOR, OBTIDOS POR EDS	52
FIGURA 33 – TOPOGRAFIA E ESPESSURA DA FF BAOSHAN	53
FIGURA 34 - TOPOGRAFIA E ESPESSURA DA FF ZYPOSCO	53
FIGURA 35 - TOPOGRAFIA E ESPESSURA DA FF ARCELOR	53
FIGURA 36 -ASPECTO DO CENTRO COM REVESTIMENTO DLC NO FINAL DO ENSAIO	55
FIGURA 37 - RUGOSÍMETRO MAHR PERTHOMETER M2	57
FIGURA 38 – VISTA DA CONFIGURAÇÃO DO TRIBÓMETRO BLOUET	59
FIGURA 39 – PROMENOR DA CONFIGURAÇÃO DO TRIBÓMETRO DE MICRO-ABRASÃO POR ESFERA ROTATIVA PLINT TE-66	59
FIGURA 40 – GEOMETRIA DAS BASES PARA A FF – ENSAIO DESGASTE POR MICRO-ABRASÃO	60
FIGURA 41 – DESENHO DO PATIM E PISTA UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE ATRITO E DESGASTE – TRIBÓMETRO BLOUET	61
FIGURA 42 – IMAGEM SEM DA MORFOLOGIA DA SUPERFÍCIE DOS REVESTIMENTOS	62
FIGURA 43 – ESPESSURA DOS REVESTIMENTOS OBSERVADOS DE TOPO POR SEM	63
FIGURA 44 – ESPECTROS DA COMPOSIÇÃO DOS FILMES DE REVESTIMENTO OBTIDOS POR EDS	66
FIGURA 45 - ANÁLISE AFM 3D DA MORFOLOGIA DOS REVESTIMENTOS	68
FIGURA 46 - MICROSCOPIA ÓPTICA DO SULCO PROVOCADO PELO <i>SCRATCH TEST</i> NO REVESTIMENTO DE TIALN E RESPECTIVO DETALHE	70
FIGURA 47 – INDENTAÇÕES ROCKWELL COM UMA CARGA DE 150 KGF, COM UMA AMPLIAÇÃO DE 100X (ESQUERDA) E 200X (DIREITA), RESPECTIVAMENTE	71
FIGURA 48 – SEM DA SUPERFÍCIE DAS PISTAS APÓS CONTACTO COM A FF NO TRIBÓMETRO DE BLOUET (A DIREÇÃO DE DESLIZAMENTO ESTÁ IDENTIFICADA COM SETA PRETA)	75
FIGURA 49 – IMAGEM SEM E RESPECTIVOS EDS NA SUPERFÍCIE DA PISTA RESVESTIDA APÓS CONTACTO COM FF	77
FIGURA 50 – IMAGEM SEM E RESPECTIVOS E ESPETROS DA FF APÓS ENSAIO DE DESGASTE NO TRIBÓMETRO DE BLOUET COM REVESTIMENTO CRCN	78
FIGURA 51 – IMAGEM SEM E RESPECTIVOS E ESPETROS DA FF APÓS ENSAIO DE DESGASTE NO TRIBÓMETRO DE BLOUET COM REVESTIMENTO WC	79
FIGURA 52 – IMAGEM SEM E RESPECTIVOS E ESPETROS DA FF APÓS ENSAIO DE DESGASTE NO TRIBÓMETRO DE BLOUET COM REVESTIMENTO B <sub>4</sub> C	80
FIGURA 53 – IMAGEM SEM E RESPECTIVOS E ESPETROS DA FF APÓS ENSAIO DE DESGASTE NO TRIBÓMETRO DE BLOUET COM REVESTIMENTO MO	81
FIGURA 54 – IMAGEM SEM E RESPECTIVOS E ESPETROS DA FF APÓS ENSAIO DE DESGASTE NO TRIBÓMETRO DE BLOUET COM REVESTIMENTO TIALN	82
FIGURA 55 – IMAGEM SEM E RESPECTIVOS ESPECTROS DAS PARTÍCULAS DE REVESTIMENTO NA SUPERFÍCIE DA FF (BLOCO)	84
FIGURA 56 – GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO ATRITO AO LONGO DOS CICLOS	87
FIGURA 57 – ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DA ESFERA REVESTIDA COM WC	88
FIGURA 58 – ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DA ESFERA REVESTIDA COM TIALN	89
FIGURA 59 – ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DA FF EM CONTACTO COM A ESFERA REVESTIDA COM WC	90

---

FIGURA 60 - FOTOGRAFIAS TERMOGRÁFICAS DA FERRAMENTA APÓS 18 MIN DE TRABALHO: A) TEMPERATURA FERRAMENTA NÃO REVESTIDA, B) TEMPERATURA FERRAMENTA REVESTIDA	91
FIGURA 61 - ASPECTO DA FERRAMENTA REVESTIDA APÓS 18 MINUTOS DE ENSAIO	92
FIGURA 62 - ASPECTO DA FERRAMENTA REVESTIDA APÓS 55.000 TAMPOS	93



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES DE REFERÊNCIA PARA A QUANTIDADE DE REVESTIMENTO DE ESTANHO [3]	10
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DO ESTANHO [6]	11
TABELA 3 – VALORES RP E RM DE REFERÊNCIA PARA CADA CLASSE DE AÇO [3]	12
TABELA 4 – VALORES DE DUREZA – REDUÇÃO ÚNICA [3]	13
TABELA 5 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA FF [3]	14
TABELA 6 – EFEITO DA FOLGA DE CORTE SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DA PAREDE INTERIOR DO FURO [10]	29
TABELA 7 – FOLGA DE CORTE RECOMENDADA PARA DIFERENTES RESISTÊNCIAS AO CORTE E ESPESSURA DE CHAPAS [10]	30
TABELA 8 – DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DA FERRAMENTA DE ESTAMPAGEM E RESPECTIVOS AÇOS USADOS	46
TABELA 9 – DESIGNAÇÕES DO AÇO 1.2379 SEGUNDO DIVERSAS NORMAS [48]	47
TABELA 10 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO 1.2379 [49]	47
TABELA 11 – MAPA DE CONTROLO DE CARACTERÍSTICAS NA RECEPÇÃO DA FOLHA FLANDRES (*S1: SUPERFÍCIE 1, S2: SUPERFÍCIE)	48
TABELA 12 – VALORES MÉDIOS E DESVIO DA DUREZA, ESPESSURA DA FOLHA FLANDRES E CAMADA DE ESTANHO	49
TABELA 13 – IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS DE FF	49
TABELA 14 – RESUMO DOS VALORES OBTIDOS NO ENSAIO DE TRACÇÃO A QUINZE PROVETES DE CADA FORNECEDOR (L: SENTIDO LAMINAGEM; OL: SENTIDO OPOSTO A LAMINAGEM; A 45° DO SENTIDO DE LAMINAGEM)	50
TABELA 15 - PROPRIEDADES TÍPICAS DO REVESTIMENTO DE TIALN (SUBSTRATO DE AÇO RÁPIDO AISI M2) [58]	54
TABELA 16 - PROPRIEDADES TÍPICAS DO DLC (SUBSTRATO DE AÇO RÁPIDO AISI M2) [46]	55
TABELA 17 – PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO UTILIZADOS NA PULVERIZAÇÃO CATÓDICA (PVD)	56
TABELA 18 – VALORES DE RUGOSIDADE OBTIDOS POR AFM	69
TABELA 19 – VALORES FALHAS COESIVAS E ADESIVAS	69
TABELA 20 – MICRO-DUREZA E MÓDULO YOUNG DOS REVESTIMENTOS EM ESTUDO	72
TABELA 21 – VALORES MÉDIOS DO COEFICIENTE DE ATRITO OBTIDOS EM TESTES TRIBOLÓGICOS REALIZADOS NO TRIBÓMETRO DE BLOUET	86
TABELA 22 – DADOS DOS ENSAIOS EM PRODUÇÃO	93



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>3</b>
<b>1.1</b>	<b>Enquadramento</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>Objectivos</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>Metodologia</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Aço usado em embalagens alimentares</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2</b>	<b>Ferramentas corte/estampagem</b> .....	<b>15</b>
2.2.1	Estrutura ferramenta e seus componentes	16
2.2.2	Parâmetros geométricos da ferramenta	25
2.2.3	Desgaste em ferramentas corte/estampagem	26
<b>2.3</b>	<b>Revestimentos para ferramentas</b> .....	<b>30</b>
<b>2.4</b>	<b>Revestimentos utilizados neste trabalho</b> .....	<b>33</b>
2.4.1	CrCN - Carbonitreto de crómio	33
2.4.2	WC - Carboneto de tungsténio	34
2.4.3	B <sub>4</sub> C - Carboneto de Boro	35
2.4.4	Mo – Molibdénio	35
2.4.5	TiAlN – Nitreto titânio alumínio	36
<b>2.5</b>	<b>Técnicas e métodos de análise dos revestimentos</b> .....	<b>37</b>
2.5.1	Técnica de deposição do revestimento – PVD ( <i>Physical Vapours Deposition</i> )	37
2.5.2	Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM - <i>Scanning Electron Microscopy</i> )	37
2.5.3	Espectroscopia de raios-x por dispersão de energia – EDS ( <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> )	38
2.5.4	Microscopia de força atómica – (AFM – <i>Atomic Force Microscopy</i> )	38
2.5.5	Rugosidade	39
2.5.6	Microdureza	39
2.5.7	Adesão (Identação e scratch)	39
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>43</b>
<b>3.1</b>	<b>Caracterização empresa</b> .....	<b>43</b>
<b>3.2</b>	<b>Caracterização do problema</b> .....	<b>45</b>

3.2.1 Definição do produto	45
3.2.2 Ferramenta	45
3.2.3 Folha Flandres (caracterização da folha – ensaios laboratório)	48
3.2.3.2 Caracterização metalúrgica	51
3.2.4 Revestimento	53
<b>3.3 Descrição dos equipamentos e métodos de análise do revestimento</b>	<b>55</b>
3.3.1 Técnica de deposição do revestimento – PVD ( <i>Physical Vapours Deposition</i> )	55
3.3.2 Métodos de análise da morfologia e espessura	56
3.3.3 Microdureza	57
3.3.4 Adesão (Identação e <i>scratch</i> )	58
3.3.5 Caracterização do comportamento ao desgaste	58
<b>3.4 Desenvolvimento de novos revestimentos</b>	<b>60</b>
3.4.1 Caracterização laboratorial dos revestimentos	60
3.4.2 Caracterização em serviço	90
<b>4 CONCLUSÕES</b>	<b>97</b>
<b>5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO</b>	<b>101</b>
<b>5.1 ARTIGOS EM REVISTAS INTERNACIONAIS</b>	<b>106</b>
<b>6 ANEXOS</b>	<b>111</b>
6.1 ANEXO 1 - Perfilometria	111
6.1 ANEXO 2 – Imagens SEM superfície dos revestimentos	113
6.2 ANEXO 3 – Imagens SEM e EDS superfície revestimento tribómetro bluot	115
6.3 ANEXO 4 – Resultados perfilometria	120

# INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

1.2. Objectivos

1.3. Metodologia

1.4. Estrutura



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Embora uma enorme quota de mercado de embalagens utilize polímeros, outros materiais são também usados em embalagens, apresentando algumas vantagens ambientais pela facilidade com que podem ser separados e reciclados indefinidamente, ou quase indefinidamente. Embalagens utilizadas para produtos farmacêuticos e na indústria alimentar exigem o cumprimento de normas mais exigentes, a fim de evitar contaminações e conservar os produtos, evitando a acção do ambiente, aumentando assim a vida útil do produto durante o armazenamento e até à sua utilização.

Entre os restantes materiais utilizados para embalagens, tais como o vidro, papel ou metal, o último apresenta normalmente todos os requisitos necessários para poder ser utilizado na indústria alimentar. Efectivamente, as embalagens metálicas fornecem dois requisitos importantes necessários neste tipo de produtos: permite a protecção contra qualquer influência externa sobre o alimento durante os períodos de armazenamento e de transporte, através de fecho hermético eficiente, e permite incluir todas as informações necessárias sobre o produto [1]. Além disso, as embalagens metálicas podem assumir várias formas: latas para refrigerantes, latas para alimentos, aerossóis para cremes, etc. O processo de fabrico das embalagens pode envolver diferentes processos mecânicos, começando normalmente pelo corte e estampagem para a produção dos elementos de fecho (tampos e fundos), entre outros, que permitem a obtenção da embalagem com propriedades herméticas. Consequentemente, as ferramentas utilizadas nos processos de estampagem estão permanentemente a ser afectadas por fenómenos de desgaste indesejáveis e imprevisíveis, devido ao atrito entre a chapa de metal a ser conformada e a ferramenta, afectando assim a conformabilidade das peças e a qualidade da sua superfície [2]. Outras aplicações que não no sector das embalagens, tais como a indústria automóvel, estão cada vez mais a recorrer a aços avançados de elevada resistência e a aços de dupla fase. Estes trazem novos desafios relativamente ao retorno elástico e desgaste de ferramentas. Também os aços utilizados nas embalagens (folha-de-flandres) trazem alguns problemas para as ferramentas, devido à fina camada de estanho na superfície da folha, pois este é relativamente macio e facilmente aumenta o atrito entre a ferramenta e a peça, mesmo em estampagens pouco profundas. Vários estudos têm sido realizados a fim de melhorar o processo de estampagem e o comportamento das ferramentas, na tentativa de se minimizar os períodos não produtivos. A lubrificação é a solução comum para minimizar problemas de atrito e desgaste prematuro das ferramentas. Por outro lado, os clientes finais

destas embalagens são cada vez mais exigentes na ausência de marcas de lubrificante nos produtos que recebem. Assim, a solução passará pela restrição da utilização de lubrificantes durante o processo de estampagem, ou será necessário proceder à limpeza de cada peça produzida, com recurso a um desengordurante. Embora estes lubrificantes utilizados possuam certificação alimentar, o aspecto visual que transparece no produto final (brilho, gordura), não é aceite pelo cliente e consumidor final. Aliás, foram as reclamações do cliente relativamente à presença de lubrificantes na superfície dos tampos, que estiveram na origem das motivações para o desenvolvimento deste estudo. Embora o processo fosse desenvolvido sem problemas com recurso a lubrificantes e o excesso de lubrificante fosse removido com a passagem do produto acabado por um forno, onde se dava a sua evaporação, era pertinente a mudança de paradigma, de forma a possibilitar o funcionamento do processo sem recurso a lubrificantes. Foi então dedicada especial atenção aos revestimentos que possibilitassem estas condições.

## 1.2 Objectivos

Este trabalho tem como objectivo caracterizar e estudar as propriedades tribológicas e mecânicas de revestimentos monocamada do tipo CrCN, WC, B<sub>4</sub>C, Mo e TiAlN, obtidos com recurso à técnica de projecção catódica em fase de vapor (PVD – *Physical Vapour Deposition*), realizados pela empresa TEandM sediada em Coimbra.

Outro objectivo deste trabalho seria testar o comportamento destes revestimentos em contexto industrial de estampagem, minimizando ou eliminando o recurso a lubrificantes.

## 1.3 Metodologia

Numa fase inicial, foi feita uma abordagem teórica aos revestimentos mais usados e ao processo de estampagem, através de uma pesquisa orientada para estes assuntos.

Numa fase posterior, o estudo foi dedicado aos revestimentos anteriormente aplicados em condições de trabalho similares. Foram, então, estabelecidas as condições em laboratório que mais se aproximassem das condições de trabalho em produção.

Os revestimentos utilizados para estudos comparativos foram seleccionados com base na experiência de parceiros que já trabalhavam com a empresa de estampagem.

A primeira série de testes passou pela caracterização dos revestimentos (química; morfológica; estrutura e estado de tensão; dureza; adesão e tribológica) com vista à análise do comportamento em laboratório, com vista a poder-se posteriormente

estabelecer possíveis relações entre o comportamento em laboratório e o comportamento real da ferramenta em serviço.

A análise crítica dos resultados obtidos forneceu directivas para o desenvolvimento e refinamento da estrutura dos revestimentos que apresentaram melhor comportamento nos ensaios.

#### 1.4 Estrutura

Neste capítulo é realizado um enquadramento ao tema, são estabelecidos os objectivos e é descrita a metodologia utilizada nesta dissertação, sendo apresentada a estrutura que compõe esta dissertação.

No capítulo 2 é feito um enquadramento teórico sobre as ferramentas de estampagem e o aço utilizado na sua construção. É abordado também o *state of the art* relativo a revestimentos utilizados neste tipo de processo industrial, bem como as técnicas de caracterização de filmes finos.

No capítulo 3 é desenvolvida uma explicação mais extensa sobre as principais motivações que conduziram ao desenvolvimento do presente trabalho, os revestimentos seleccionados para estudo e são apresentados e comentados os resultados obtidos, tanto em ambiente laboratorial como em contexto industrial.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1. Aço usado em embalagens alimentares
  - 2.2. Ferramentas corte/estampagem
  - 2.3. Revestimentos para ferramentas
- 2.4. Técnicas e métodos de análise dos revestimentos
- 2.5. Técnicas e métodos de análise dos revestimentos



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aço usado em embalagens alimentares

A folha-de-flandres (FF) é especificada como sendo um produto fornecido na forma de rolo (*coil*) para subsequente corte em folhas. Consiste numa folha de aço macio, de baixo teor em carbono, que sofreu uma redução de secção a frio, sendo posteriormente revestida através de um processo eletrolítico, com uma ou duas camadas de estanho, crómio ou óxido de crómio (*ECCS – Electrolytic Chromium/chromium oxide Coated Steel*). A espessura da chapa varia entre 0,13 mm – 0,49 mm, e o peso da camada de estanho representa menos de 1% do peso total da chapa revestida [3].



Figura 1 – Bobina de Folha-de-Flandres [4]

Uma vez que a percentagem de carbono na FF é baixa, para evitar a oxidação do aço e fornecer uma camada protetora, é aplicado um revestimento de estanho na sua superfície, possuindo um comportamento catódico relativamente ao substrato (aço). Por este motivo, a deposição deste revestimento deve ser controlada de forma a eliminar áreas microscopicamente desprotegidas. De acordo com a posterior utilização, é possível produzir a espessura da camada de forma a que esta esteja adequada à severidade do ataque do produto a embalar. Quando a camada de estanho é diferente nas duas superfícies, a que possui uma maior espessura de estanho é identificada por linhas com espaçamento padronizado. Apesar de ser um material pouco resistente mecanicamente, o estanho não é tóxico e é muito resistente à corrosão por ácidos não muito agressivos e orgânicos.

O estanho utilizado para revestimento possui uma pureza superior a 99,85% e, uma vez exposto à atmosfera, forma na sua superfície um filme de óxido - dióxido de estanho [ $\text{SnO}_2$ ]. De forma a estabilizar a superfície, a folha é sujeita a um tratamento de passivação através de uma solução de dicromato de sódio, resultando numa camada muito fina de óxido de crómio que impede a formação de óxido de estanho e, desta forma, é melhorada a resistência à oxidação e procede-se a uma adequação para posterior envernizamento e litografia.

Existem dois tipos de passivação utilizados com mais frequência (Figura 2):

- Processo com tratamento catódico numa solução de dicromato de sódio;
- Tratamento simples de imersão numa solução de dicromato de sódio.



Figura 2 – Diferentes camadas que constituem a folha-de-flandres (vista em corte) [5]

Os valores de referência utilizados para o revestimento nominal de estanho podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de referência para a quantidade de revestimento de estanho [3]

Quantidade de revestimento nominal	Quantidade de revestimento para aplicações em soldadura por resistência de alta velocidade*		Quantidade de revestimento para outras aplicações	
g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup> min.	g/m <sup>2</sup> máx.	g/m <sup>2</sup> min.	g/m <sup>2</sup> máx.
1,00	0,75	1,80	0,75	Sem requisitos técnicos
1,40	1,10	2,30	1,10	
2,00	1,60	3,00	1,60	
<b>2,80</b>	<b>2,30</b>	<b>3,90</b>	<b>2,30</b>	
4,00	3,35	5,30	3,35	
5,00	4,20	6,50	4,20	
5,60	4,70	7,20	4,70	
8,40	7,15	Sem requisitos técnicos	7,15	
11,20	9,55		9,55	
14,00	11,95		11,95	
15,10	12,90		12,90	

\* Soldadura por processo contínuo de resistência elétrica com velocidades superiores a 30 m/min.

A Tabela 2 apresenta algumas as características do estanho.

Tabela 2 – Características do estanho [6]

Estanho	Metal branco-prateado
	Maleável (resistência mecânica baixa)
	Bom condutor elétrico
	Material cristalino
	Baixo ponto de fusão: 232°C
	Ponto de ebulição: 2602°C

Relativamente ao aço base, este confere à embalagem as propriedades mecânicas necessárias, devido à sua espessura e dureza. Existem três tipos de aços denominados de:

- L: com baixo teor em fósforo e em elementos residuais, utilizado para acondicionar produtos fortemente corrosivos;
- MR: possui elementos residuais semelhantes ao tipo L, com índices inferiores do elemento fósforo, indicado para produtos moderadamente corrosivos;
- MC: é um aço fosforizado com alta resistência mecânica mas, baixa resistência à corrosão, usado para produtos pouco agressivos.

O processo de obtenção da FF tem as etapas iniciais em comum com todos os produtos laminados. O processo começa com a laminagem a quente de lingotes de aço, com o objetivo de obter uma redução de espessura. O aço é sujeito a etapas sucessivas de laminagem, onde a placa passa de uma espessura de 22 mm a 25 mm para 2 mm a 2,5 mm, o que corresponde a uma redução de 90%. Nesta fase, a temperatura de acabamento influencia directamente as propriedades mecânicas finais da folha de aço, o que implica velocidades de arrefecimento mais lentas, as quais dão origem a folhas mais duras.

A fase seguinte é a decapagem contínua, onde ocorre a limpeza da superfície da folha de aço para a retirada dos óxidos que se formam durante o processo de laminagem a quente. Após a decapagem, a folha é sujeita a laminagem a frio, ou seja, a uma laminagem abaixo da temperatura de recristalização do aço (727°C), em que ocorre o encruamento com aumento da resistência à tracção, dureza e limite de escoamento. Deste processo sai prejudicada a ductilidade, havendo a necessidade de tratamento de alívio de tensões para a recristalização dos grãos. Nesta fase, a folha passa por uma redução entre 70 a 90% da espessura original, ou seja, para valores de espessura entre os 0,18 mm e 0,45 mm.

Para uma FF com um processo de redução de secção simples, é especificada uma espessura nominal em múltiplos de 0.005 mm no intervalo de 0,17 mm – 0,49 mm. Para FF com redução dupla, é especificada uma espessura nominal, igualmente, em múltiplos de 0.005 mm, no intervalo de 0,13 mm – 0,49 mm.

O óleo que fica depositado na superfície após a operação de laminagem a frio é removido na etapa seguinte, durante a qual há uma limpeza eletrolítica, seguida de etapas de lavagens e secagem a sopro de ar quente, que serve de preparação ao recozimento. Na fase de recozimento, a folha passa por um laminador de encruamento, em que as operações consistem no encruamento superficial e na laminagem de dupla redução. Este processo tem como objetivo uniformizar as propriedades superficiais do aço, aumentar a rigidez e conseguir o acabamento superficial pretendido. O processo final é o revestimento das superfícies do aço com estanho, com recurso a um processo de deposição eletrolítica e, finalmente, é depositado um filme de óleo.

Na caracterização mecânica da FF é utilizado o ensaio de tração, que traduz parâmetros de cedência, limite de elasticidade e resistência à tração, que vão ser importantes para definir a capacidade de deformação que a chapa apresenta, mostrando a forma mais ou menos fácil com que poderá ser trabalhada por corte e estampagem. A Tabela 3 traduz os valores expectáveis para as diferentes classes de aço.

Tabela 3 – Valores Rp e Rm de referência para cada classe de aço [3]

Classe de aço	Número do aço	Tensão cedência (Rp) a 0,2% [N/mm <sup>2</sup> ]		Tensão máxima (Rm) [N/mm <sup>2</sup> ]	
		Valores objetivo	Desvio	Valores objetivo	Desvio
TS230	1.0371	230		325	
TS245	1.0372	245		340	
TS260	1.0379	260		360	
TS275	1.0375	275		375	
TS290	1.0381	290		390	
TS550	1.0385	550	±50	575	±50
TH415	1.0377	415		435	
TH435	1.0378	435		460	
<b>TH520</b>	<b>1.0384</b>	<b>520</b>		<b>540</b>	
TH550	1.0373	550		570	
TH580	1.0382	580		590	
TH620	1.0374	620		625	

Nota 1: A classe de aços TH520, TS550, TH580 e TH620 são normalmente fornecidos com dupla redução, todas as outras classes são fornecidas com uma redução simples.

Nota 2: A Tabela 3 representa as classes de aço mais comumente utilizado. Existem outras classes disponíveis para usos específicos.

Nota 3: A classe de aço TS260 surgiu com o intuito de substituir a classe TS245, uma vez que possui um maior número de aplicações.

Nota 4: Os desvios apresentados são referentes a medições em amostras individuais.

Nota 5: O desvio de  $\pm 50$  apresentado na tabela representa a amplitude normal nas classes especificadas. Para classes de usos específicos, a tolerância de  $\pm 40$  pode ser fornecida.

Nota 6: O teste de tração da FF está a ser alterado, sendo que os valores apresentados têm como base os valores atualmente disponíveis.

Nota 7: As classes de lotes recozidos devem ser designadas com a letra S. Classes de lotes com recozimento contínuo devem ser designadas com a letra H.

Para os valores de referência da dureza, a Tabela 4 resume os valores típicos para cada uma das classes de aços.

Tabela 4 – Valores de Dureza – Redução única [3]

Valores de dureza Rockwell HR30Tm (apenas servem como referência)						
Espessura [mm]	$t \leq 0,21$		$0,21 \leq t \leq 0,28$		$t \geq 0,28$	
Classes de aços	Valor Nominal	Desvio	Valor Nominal	Desvio	Valor Nominal	Desvio
TS230	Máx. 53		Máx. 52		Máx. 51	
TS245	53	$\pm 4$	52	$\pm 4$	51	$\pm 4$
TS260	56	$\pm 4$	55	$\pm 4$	54	$\pm 4$
TS275	58	$\pm 4$	57	$\pm 4$	56	$\pm 4$
TS290	60	$\pm 4$	59	$\pm 4$	58	$\pm 4$
TS550						
TH415	62	$\pm 4$	61	$\pm 4$	60	$\pm 4$
TH435	65	$\pm 4$	65	$\pm 4$	64	$\pm 4$
<b>TH520</b>						
TH550						
TH580						
TH620						

Nota 1: Esta tabela representa as classes de aço mais comumente utilizadas. Existem outras classes disponíveis para usos específicos.

Nota 2: Os desvios apresentados são referentes a medições em amostras individuais.

O material utilizado na aplicação em estudo é identificado industrialmente com o código 61-07052 e referência 819 x 0,15, que representam a largura da bobina e espessura da folha, respectivamente. A classe do aço é a TH520, o que traduz uma dureza superior a 65HR30Tm, e uma espessura do revestimento de estanho igual nas duas faces, de 2,8 g/m<sup>2</sup>. A FF usada em aplicações que utilizem processo de soldadura contém, normalmente, os elementos apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química da FF [3]

<b>Composição química de referência</b>	
<b>Elemento</b>	<b>% máxima em peso</b>
<b>C</b>	0,04 - 0,08
<b>Mn</b>	0,18 - 0,35
<b>S</b>	0,02
<b>P</b>	0,02
<b>Si</b>	0,03
<b>Cu</b>	0,08
<b>Ni</b>	0,08
<b>Sn</b>	0,02
<b>As</b>	0,02
<b>Mo</b>	0,02
<b>Cr</b>	0,08
<b>N</b>	0,008
<b>Al</b>	0,02 - 0,08
<b>outros</b>	0,02

A capacidade da FF ser conformada depende da influência da composição química, dimensão da chapa, da macro e microestrutura, acabamento superficial, encruamento e envelhecimento. A composição química será o fator de maior influência. O teor de carbono não deverá exceder os 0,15%, estando contido, idealmente, entre 0,04% - 0,10%, para que não se formem quantidades elevadas de carbonetos de ferro (forma de perlite ou cementite) e, se provoque excessivo refinamento do grão final, que provocaria a redução da ductilidade. O manganês é mantido na faixa de 0,25% - 0,50%, uma vez que acima dos 0,50% começa a elevar a resistência mecânica. Tem como função compensar os efeitos negativos provocados pelo enxofre na deformação a quente do aço, e na aceleração da corrosão. Teores elevados de fósforo e enxofre são prejudiciais ao aço, por isso, e de forma a evitar problemas na estampagem, o teor de enxofre deve ser controlado entre os valores de 0,015% a 0,040%. Para se diminuir a fragilidade a frio, o teor de fósforo não deve ser superior a 0,015%. Para se conseguir um aumento da rigidez e resistência à corrosão, são adicionados elementos como azoto, boro ou níquel. A adição do cobre influencia favoravelmente a resistência à corrosão entre os teores 0,10% e 0,3%. Uma concentração elevada de silício diminui a estampabilidade da folha, portanto, encontra-se entre os valores de 0,01% a 0,02%. O silício é também abrasivo, o que poderá causar desgaste na ferramenta [3-7].

## 2.2 Ferramentas corte/estampagem

O processo de estampagem caracteriza-se por ser uma deformação plástica de uma placa de metal. É um conjunto de operações realizadas normalmente a frio, em que uma chapa plana é sujeita a uma ou mais transformações por corte ou deformação, com o objetivo de se obter peças com geometrias específicas. Os processos existentes para conformação plástica podem ser classificados em dois grupos elementares: estampagem profunda ou embutidura (ou estiramento) e conformação geral.

A conformação geral de peças pode ser utilizada em tiras que serão dobradas ou redobradas, pedaços de tubos que serão abaulados ou cravados, ou ainda, discos que serão estampados e depois cravados (ex: tampa refrigerante). Nestes processos, a zona de deformação sofre esforços de flexão, que dobram uma área, criando esforços de tração numa superfície, e de compressão na superfície oposta.

Pelo processo de estampagem profunda, os copos obtidos são conformados a partir de discos planos e de formato cilíndrico, sendo que qualquer forma obtida é de revolução. Os discos podem possuir vários diâmetros, ter fundo esférico ou plano e, paredes laterais inclinadas, alterando a forma do copo para geometria cônica.

As tensões presentes em qualquer plano vertical que passe pelo eixo de simetria são similares, em função da paridade geométrica. Assim sendo, a possibilidade de enrugamento na flange e fissuras na região lateral adjacente ao fundo do copo durante o processo de estampagem, são praticamente as mesmas.

O disco metálico é deformado em direção à cavidade circular da matriz (Figura 5), por meio da ação de um punção na sua região central. Em simultâneo, a aba ou flange movimenta-se em direção à cavidade (zona onde não actua o punção, mas somente o cerra-chapas). À medida que a região central do disco penetra na cavidade da matriz, a região da aba sofre uma redução gradativa do diâmetro do disco. Nessa região, actuam esforços na direção tangente dos círculos concêntricos ao eixo central, que tendem a enrugar a chapa, também denominados de compressão circunferencial. Para contrariar este efeito, é aplicada uma tensão de compressão através do cerra-chapas.

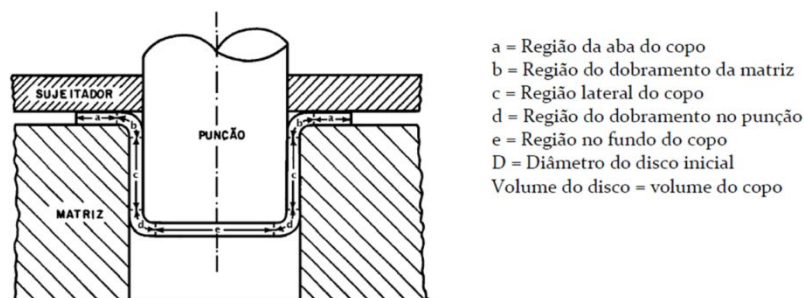


Figura 3 – Regiões do copo sob estampagem [8]

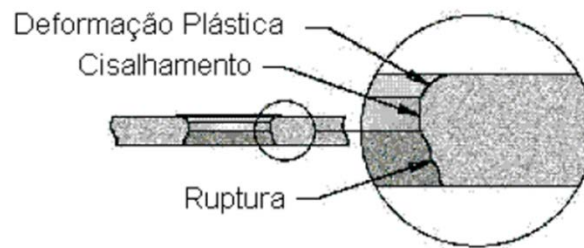


Figura 4 – Representação do corte de uma chapa [9]

As ferramentas de estampagem (Figura 4) podem ser definidas em três tipos: ferramentas de corte, ferramentas de dobragem e de estampagem profunda. São constituídas por elementos comuns, a outro tipo de ferramentas (base inferior, cabeçote ou base superior, espiga, colunas de guia, placa de choque, placa guia, parafusos e pinos de fixação, entre outros) e por elementos específicos e responsáveis pelo formato da peça a produzir (matriz e punção).

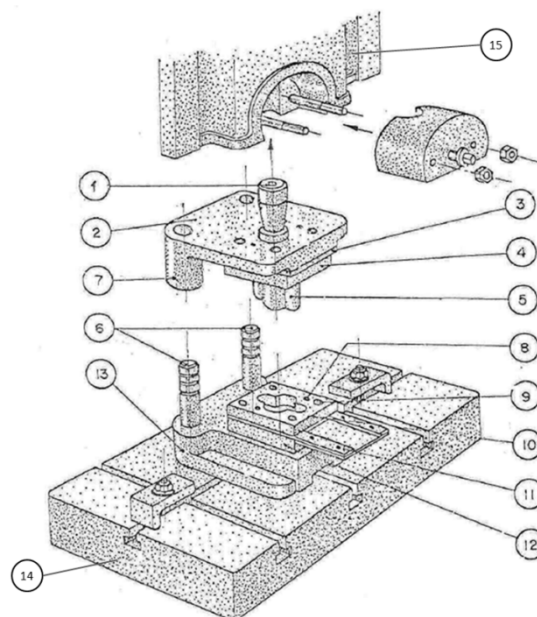


Figura 5 – Estrutura de uma ferramenta de estampagem [10]

1- Espiga ou nariz; 2- Cabeçote, base superior ou bloco superior; 3- Placa de choque; 4- Porta-Punção; 5- Punção; 6- Colunas de guia ou cavilhas; 7- Buchas ou casquilhos guia; 8- Pinos de fixação; 9- Parafusos de fixação; 10- Extractor ou placa guia; 11- Guias da chapa ou calços de guia; 12- Matriz; 13- Base inferior ou bloco inferior; 14- Mesa da prensa; 15- Corrediça da prensa.

### 2.2.1 Estrutura ferramenta e seus componentes

O punção e a matriz são os elementos mais importantes na ferramenta de estampagem. No entanto, para que seja possível cumprir os requisitos de precisão e fiabilidade da ferramenta, estes dois elementos são apoiados por um conjunto mais ou

menos complexo de outros componentes, de acordo com o tipo de produto final. A função de cada um dos componentes é descrita como:

- 1 – **Espiga ou nariz:** a fixação da parte móvel da ferramenta (cabeçote) à corrediça da prensa é feita com recurso a um pino roscado, também denominado por espiga. A espiga é aplicada no furo existente no cabeçote e, por meio de um parafuso, fixa-se o conjunto. A espiga possui forma cilíndrica e o seu diâmetro, tal como o comprimento, deve ser dimensionada para a furação do cabeçote. Deve ser suficientemente robusta para que seja capaz de suportar o peso do cabeçote, acrescido do esforço de extração da peça. Portanto, a parte mais frágil será a zona de menor diâmetro.
- 2 – **Cabeçote, base superior ou bloco superior:** fixa toda a parte superior da ferramenta.
- 3 – **Placa de choque:** de forma a impedir que o punção penetre no cabeçote durante o processo, é colocada entre a cabeça do punção e o cabeçote uma placa de aço temperado, com espessura máxima de 5 mm a 8 mm. Outra função da placa de choque será a distribuição da pressão do punção. Existem também ferramentas em que a placa de choque possui a mesma dimensão do porta-punção, com a vantagem de facilitar a montagem de ferramentas mais complexas (ver Figura 6).

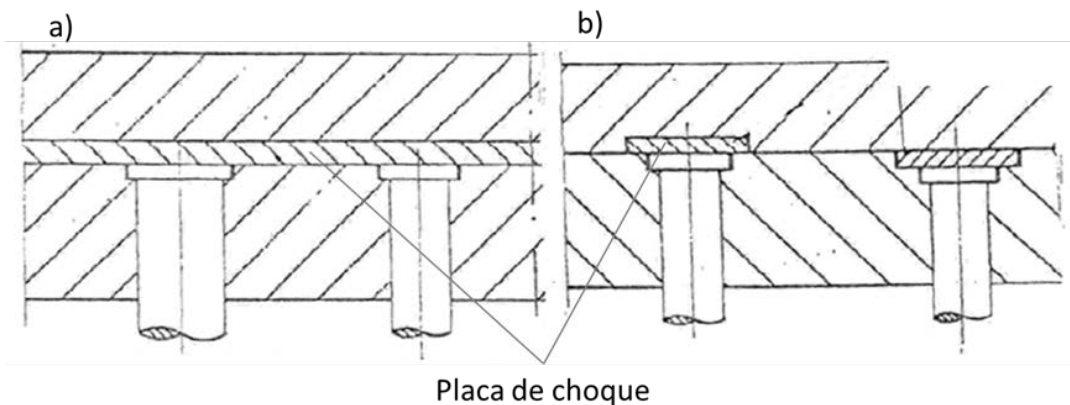


Figura 6 – a) Placa de choque Inteira; b) Placa de choque segmentada [11]

- 4 – **Porta-Punções:** têm como função fixar os punções no cabeçote. A espessura do porta-punção é um fator importante no apoio lateral do punção, e deverá ter uma relação de 0,25 relativamente ao comprimento deste. O ajuste do punção no porta-punções deve ser o mais perfeito possível, eliminando qualquer movimento possível (ver Figura 7).

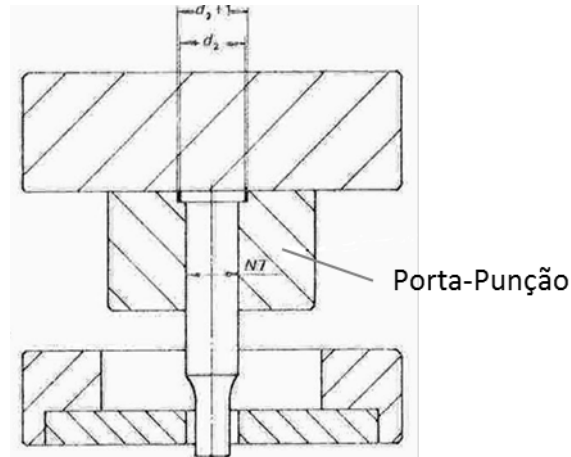


Figura 7 – Exemplo ferramenta porta-punção [11]

- **5 – Punções:** em conjunto com a matriz, transforma a chapa na geometria do produto pretendido. O tipo de punção mais utilizado é o retificado em esquadro (1), uma vez que é o mais económico e utilizado para o corte de chapas com espessura inferior a 2 mm. Os punções de diâmetro relativamente grande, normalmente são construídos com forma côncava ou com o fio de corte em ângulo (2, 3, 4 e 5). A geometria de punção representada pela Figura 8, é normalmente utilizada para trabalhos grosseiros, como na forjagem em corte a quente. Os punções com geometria tipo faca (7, 8 e 9), são utilizados para materiais não metálicos, sem matriz, e utilizam como base uma placa de borracha ou madeira.

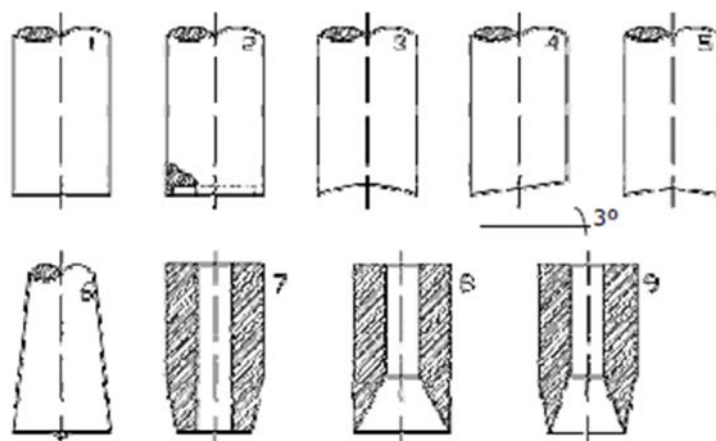


Figura 8 – Tipos de arestas de corte do punção [11]

- **6 – Colunas de guia ou cavilhas:** elementos que guiam os punções com precisão relativamente à matriz.
- **7 – Buchas ou casquilhos:** facilitam o deslizamento do cabeçote sobre as cavilhas, para que se obtenha um encaixe preciso entre o punção e a matriz.

- 8 – **Pinos de fixação:** são elementos que servem de referência, posicionamento e fixação, que suportam cargas elevadas originadas pelo impacto do funcionamento da ferramenta.
- 9 – **Parafusos de fixação:** unem os vários elementos entre si.
- 10 – **Extractor ou placa de guia:** faz a extração do produto ou da chapa do punção/matriz e serve de guia do punção em algumas ferramentas (Figura 9). A sua espessura está relacionada com o comprimento do punção através da relação:

$$h = \frac{L}{4} \quad 1$$

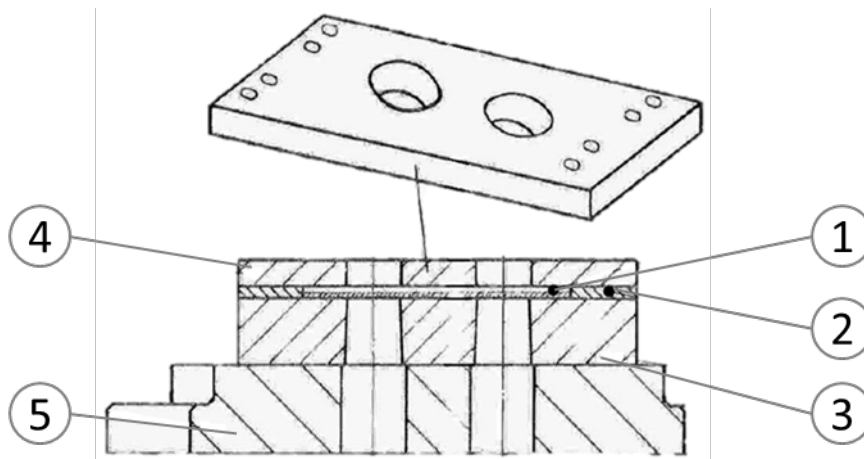


Figura 9 – Esquema localização da Placa guia: 1 – Abertura para passagem da chapa, 2 – Régua, 3 – Matriz, 4 – Placa guia, 5 – Base inferior [11]

- 11 – **Guias da chapa ou calços de guia:** estes elementos têm como objetivo guiar a chapa no interior da ferramenta (Figura 10). São montadas a uma distância entre si, tendo em consideração a largura da chapa, acrescida de uma folga mínima, normalmente 20% da espessura, que possibilite o deslizamento desta. O dimensionamento das guias é feito de acordo com os elementos de fixação, ou seja, a largura deverá ter no mínimo 2,5 vezes o diâmetro da cabeça dos parafusos. Quanto ao comprimento, é recomendado que seja duas vezes superior à largura da chapa. A espessura é um parâmetro importante, uma vez que irá garantir que não é possível entrarem duas chapas no interior da ferramenta e, conseqüentemente, existir uma rutura do punção.

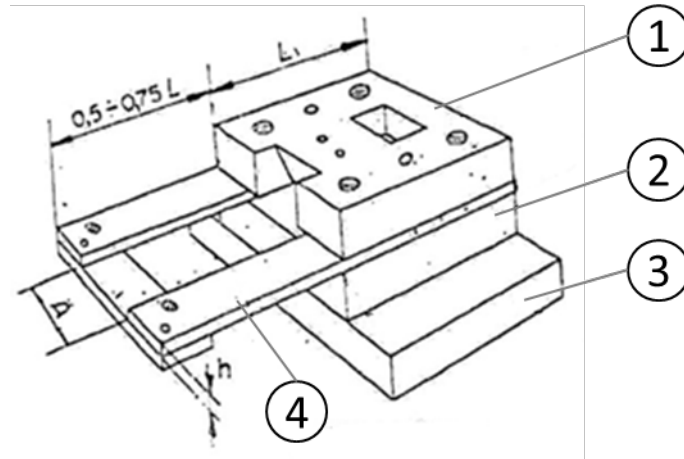


Figura 10 – Esquema das guias da chapa e suas dimensões: 1 – Placa de guia, 2 – Matriz, 3 – Base, 4 – Guias da chapa [11]

$$h = 20 \text{ a } 25 \times \text{espessura} \quad \text{para } e \cong 0,1\text{mm} \quad 2$$

$$h = 4 \text{ a } 6 \times \text{espessura} \quad \text{para } e > 0,1\text{mm}$$

- 12 – **Matriz:** elemento que define a geometria final da peça. Em conjunto com o punção, faz a operação de corte. A matriz possui o formato negativo da peça a ser fabricada, em que as suas principais características são:
  - Ângulo de saída para facilitar a retirada do material cortado;
  - Folga entre punção e matriz que possibilite o corte ou deformação da chapa,
  - Altura do talão, que determinará o número de afiamentos possíveis, e conseqüentemente, o período de vida.
- 13 – **Base inferior ou bloco inferior:** serve de apoio à matriz.
- 14 – **Mesa da prensa:** fixa a parte inferior da ferramenta.
- 15 – **Corrediça da prensa:** transmite o movimento linear (e a força) à ferramenta.

As ferramentas também podem ser classificadas de outras formas, como se segue:

- Quanto ao número de ‘ações’ a que sujeitam o material a processar: ferramentas simples, ferramentas de duplo efeito, ferramentas de triplo efeito;
- Quanto ao tipo de guiamento da ferramenta: pela prensa, pelo elemento de trabalho, por colunas de guia ou cavilhas (esferas, casquilhos ou buchas deslizantes);
- Quanto às operações que realizam: embutidura com um estágio - 1ª etapa, embutidura com um estágio - 2ª, 3ª, nª etapas (ferramentas de re-embutir),

ferramenta progressiva (embutidura com mais de um estágio numa só ferramenta), ferramenta combinada (além da embutidura, realizam também operações como corte e quinagem);

- Quanto ao tipo de embutidura: embutidura a frio, embutidura a quente, embutidura com estiramento, embutidura inversa;
- Quanto ao material em que são fabricadas: ferramentas metálicas, ferramentas poliméricas, ferramentas metálicas e poliméricas.

Quanto ao número de ‘ações’ que a ferramenta realiza, pode dizer-se que a única diferença entre as ferramentas de simples, duplo e triplo efeito serão o número de forças/ações desenvolvidas no material a ser embutido (Figura 11). As ferramentas de simples efeito são utilizadas para a produção de peças de pequena e média dimensão, tendo uma altura pouco profunda de embutidura. O principal problema neste processo é a formação de pregas no bordo da peça. As ferramentas de duplo efeito diferem das de simples efeito apenas pelo facto de possuírem um cerra-chapas. Este cerra-chapas cria um segundo efeito, provocando uma compressão na chapa contra a matriz, e desta forma permite um maior controlo do movimento da chapa durante o processo de embutidura, evitando pregas nas abas da chapa. Nas ferramentas de triplo efeito, existe um efeito na parte inferior da máquina e dois na parte superior. Este processo é utilizado para peças que necessitem de embutidura nos dois sentidos. O terceiro efeito será então a embutidura inversa, depois de conformada a peça.

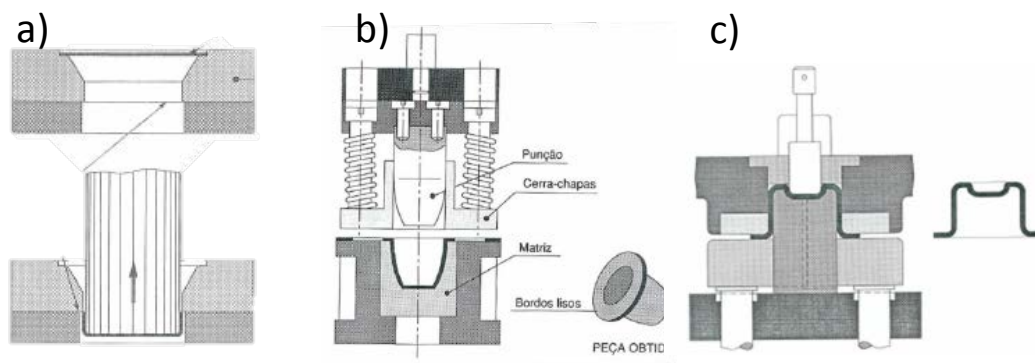


Figura 11 – a) Ferramenta de simples efeito, b) Ferramenta de duplo efeito, c) Ferramenta de triplo efeito [12]

A qualidade da precisão do guiamento influencia diretamente o rigor que se pretende na peça conformada. Portanto, é importante que exista um perfeito alinhamento das ferramentas.

O guiamento das arestas de corte do punção e da matriz pode ser garantido de três formas:

- Pela prensa:** é utilizado quando não existem tolerâncias definidas para a operação de corte. A precisão conseguida depende diretamente do estado de guiamento da corrediça da prensa;

- b. **Pelo elemento de trabalho:** referente a ferramentas com placa – guia ou placa extractora fixa. Estas placas servem de guia à zona de trabalho dos punções e extrator da chapa (devido à recuperação elástica do material, a chapa tende a ficar agarrada ao punção depois da operação de corte). A aplicação destas placas (Figura 12) evita que, em punções de pequeno diâmetro, ocorra o fenómeno de encurvadura;

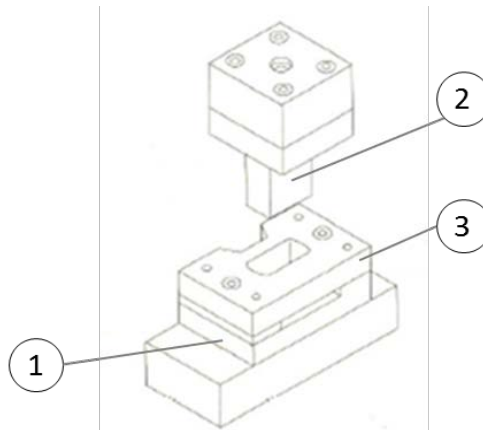


Figura 12 – Exemplo ferramenta guiada por placa de guia ou extrator fixo 1 – Matriz ; 2 – Punção; 3 – Extrator [10]

- c. **Por colunas de guia ou cavilhas (esferas, casquilhos ou buchas deslizantes):** estes elementos guiam a base superior relativamente à base inferior da ferramenta.

Quando a precisão exigida é elevada, os elementos ativos das ferramentas são montados em duas placas (uma fixa e outra móvel) (Figura 13 e Figura 14), onde o guiamento é realizado através de duas ou mais colunas de guiamento. As colunas de guia são normalmente solidárias com a parte fixa da ferramenta (base inferior), deslizando em furos da parte móvel (base superior) com buchas deslizantes ou de esferas. O ferro fundido ou o aço são geralmente utilizados como material de construção destes elementos.

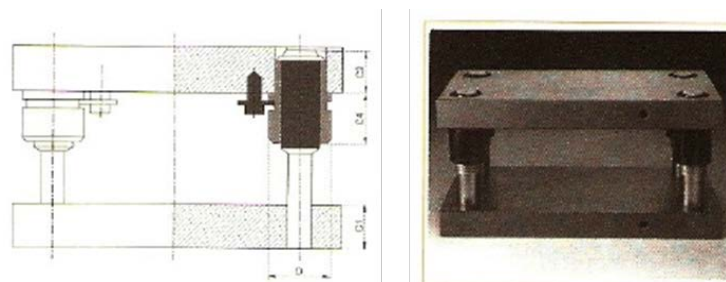


Figura 13 – Conjunto base superior - inferior normalizado (colunas guia) [10]

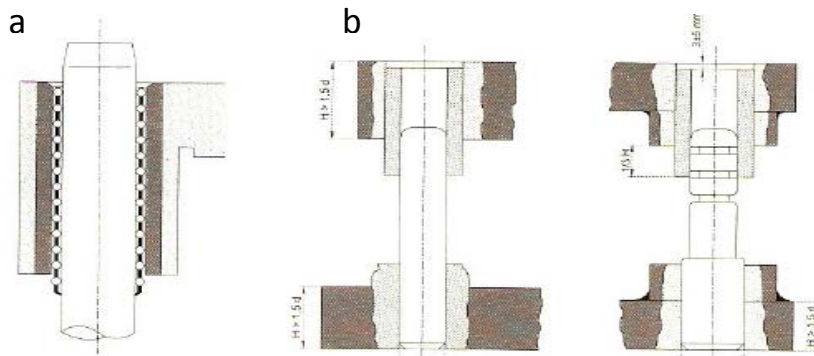


Figura 14 – Colunas guia: a) Buchas de esferas; b) Buchas deslizantes [10]

Para as ferramentas com extrator elástico (Figura 15), a função do extrator é exercer uma pressão na chapa com uma força imposta por um sistema elástico (anilhas elásticas, molas em espiral ou em elastómero). A pressão exercida deverá provocar a extração da chapa do punção, quando a corrediça da prensa inicia o movimento de subida.

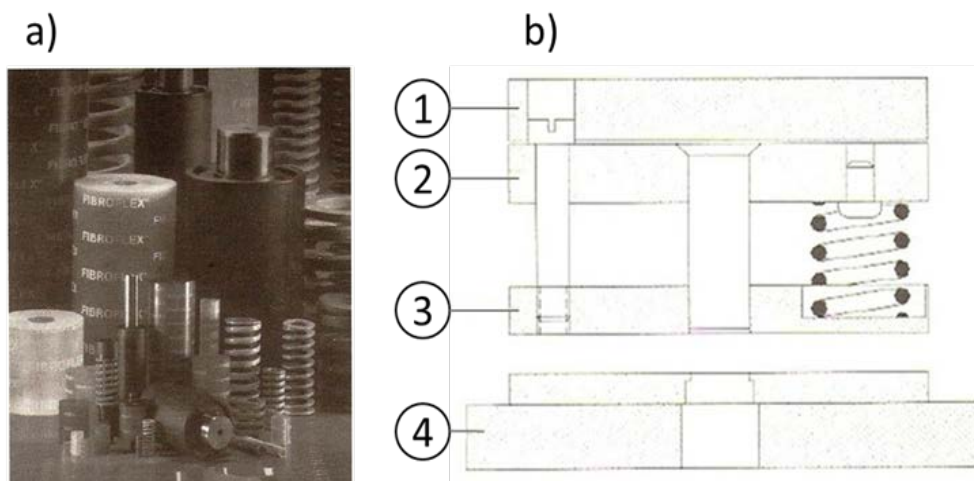


Figura 15 – a) Extractores elásticos; b) Desenho ferramenta com extrator elástico: 1 – Base superior, 2 – Placa porta-punção, 3 – Extrator elástico, 4 – Base inferior [10]

A geometria das molas pode ser variada. A Figura 16 apresenta as possíveis geometrias das molas.

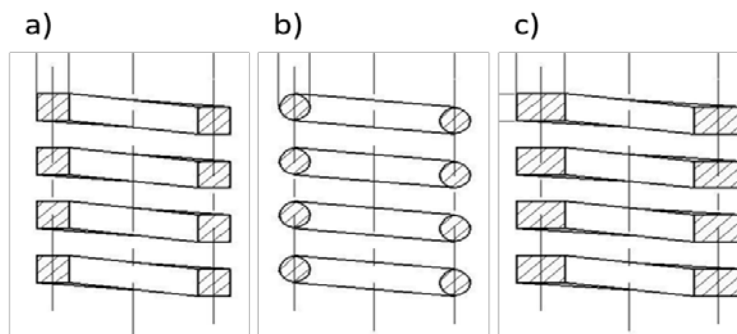


Figura 16 – Geometria possíveis das molas: a) Mola quadrada, b) Mola circular, c) Mola quadrada.

Ferramentas progressivas (Figura 17) são utilizadas quando o produto que se pretende fabricar exige várias etapas de operação de corte/conformação, sendo estas etapas sequenciais à medida que a chapa vai percorrendo a ferramenta. Neste tipo de ferramentas, a chapa sofre cortes, entalhes, arrombamentos, entre outros, conforme avança no interior da ferramenta. A última operação será a de separação do produto do esqueleto. Em cada descida da ferramenta, diferentes operações são realizadas, encontrando-se dentro da ferramenta várias peças em simultâneo e em diferentes estágios de fabrico. Estas ferramentas são normalmente guiadas por quatro colunas de guia, com casquilho guia de gaiola de esferas, com extrator fixo ou elástico. Como o avanço automático é promovido pelo sistema de alimentação, e este não é suficientemente preciso, existe a necessidade de utilizar elementos como centradores ou facas de avanço, para que seja possível garantir a precisão necessária à produção, assim como assegurar que existe reprodutibilidade do processo.

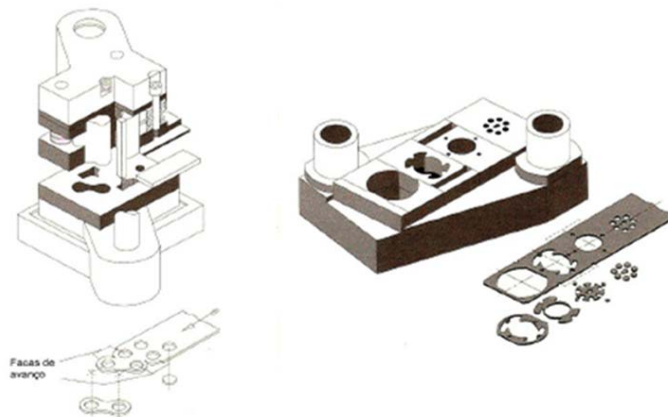


Figura 17 – Exemplo de uma ferramenta progressiva e os seus produtos [10]

Ferramentas combinadas realizam numa só descida da corrediça várias operações, tais como corte, puncionamento, embutidura, e em que a peça final é executada apenas com uma operação. Este processo permite um maior rigor na reprodutibilidade das cotas relativas das peças, comparativamente às ferramentas progressivas.

A Figura 18 representa o princípio de funcionamento de uma ferramenta combinada clássica:

- O punção fixo (5) é montado na parte inferior da ferramenta e tem como função cortar a parte exterior da chapa;
- A matriz (3) bate num extrator elástico (4) que possui guias da chapa e que extrai a chapa do punção;
- O punção interior (1) é solidário com a matriz (3) que durante a descida da matriz, punciona a peça, realizando um furo no interior. A matriz para o puncionamento encontra-se incorporada no punção (5);
- Um ejetor (2) permite a libertação da peça da abertura da matriz durante o movimento ascendente da corrediça.

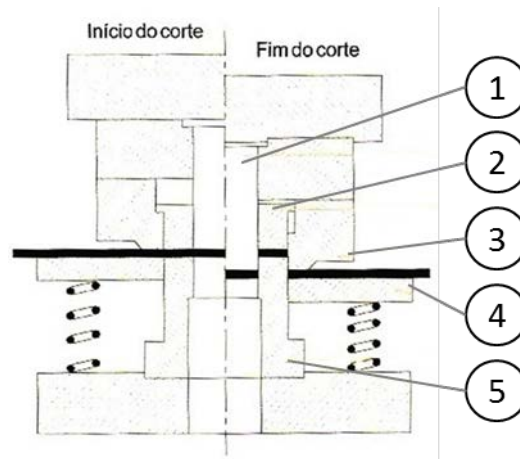


Figura 18 – Exemplo de ferramenta combinada: 1 – Punção móvel, 2 – Ejector, 3 – Matriz, 4 – Extractor elástico, 5 – Punção fixo [10]

### 2.2.2 Parâmetros geométricos da ferramenta

Existem determinados aspectos a ter em conta na construção das ferramentas, possibilitando que a embutidura seja bem-sucedida. A deformação e rutura do material produzem efeitos negativos e indesejáveis na estampagem, tais como rebarba e a falta de paralelismo das arestas cortadas. O controlo e optimização destes dois factores, são conseguidos pela utilização de ferramentas devidamente afiadas e uma folga correcta entre o punção e a matriz. Factores como o raio de concordância da matriz, o raio de concordância do punção, existência de freios, furos de entrada e saída de ar do punção e arrefecimento das ferramentas, também podem influenciar o processo.

A folga entre o punção e a matriz determinam o formato do material retirado, portanto possuem geometria e dimensões muito semelhantes (Figura 19). A diferença dimensional entre a geometria do punção e da matriz designa-se por folga. A folga radial deve ser superior à espessura nominal da chapa (prevendo as tolerâncias de espessura da chapa) e pode ser determinada pela expressão:

$$e < J < e\sqrt{(D/d)} \quad 3$$

Se for demasiado elevada, poderá ocorrer o aparecimento de rugas ou desalinhamento do embutido.



Figura 19 – Efeito da folga na superfície da chapa cortada [9]

O raio de concordância da matriz,  $r_{cm}$ , é um dos aspetos mais importantes, dado que é nesta zona da matriz que se desenvolve o processo de embutidura. O correcto dimensionamento é, portanto, crucial para que o processo de embutidura aconteça devidamente. Se o raio da matriz for demasiado pequeno, a chapa sofre uma grande sollicitação nessa zona, podendo ocorrer a ruptura do material. Se por outro lado for sobredimensionado, haverá tendência para a formação de pregas. O valor de  $r_{cm}$  para a embutidura de uma só etapa, pode ser obtido pela expressão:

$$r_{cm} = k_1 \sqrt{(D - d)e_0} \quad 4$$

O raio de concordância do punção  $r_{cp}$  não deverá ser demasiado inferior ao raio de concordância da matriz. Para o caso de o raio do fundo do embutido ser muito pequeno, será necessário recorrer a operações suplementares de conformação, para se conseguir obter o raio final pretendido. A expressão seguinte traduz o valor mínimo do raio de concordância do punção.

$$r_{cp} = r_{cm} - e_0 \quad 5$$

A existência dos freios na ferramenta possibilita a diminuição da força do cerra-chapas necessária ao processo de embutidura e, o controlo do escorregamento, por conseguinte, o modo de deformação da chapa.

De forma a controlar o escorregamento da chapa comprimida entre a matriz e o cerra-chapas, foram adicionados à ferramenta elementos salientes - Freios. Estes elementos são utilizados em processos de embutidura em que o cerra-chapas possui geometria totalmente plana, e assim não tem a capacidade de promover uma retenção suficiente do material.

### 2.2.3 Desgaste em ferramentas corte/estampagem

Como já foi referido anteriormente, durante o processo de estampagem a chapa é pressionada pelo punção contra a matriz. No momento em que o punção entra em contacto com a chapa, inicia sobre o material uma força de compressão, seguida de uma deformação por dobragem. Durante todo este processo, ocorre uma pressão contínua entre o punção e a matriz, com uma consequente reacção do material. Quando o esforço exercido pelo punção supera a resistência do material, ocorre a

rutura deste. A deformação e rutura do material produzem efeitos negativos e indesejáveis no processo e ferramentas de estampagem.

O parâmetro que mais influência a durabilidade das ferramentas, será a folga (Figura 20) entre a matriz e o punção. Folgas maiores prolongam a vida da ferramenta, enquanto que folgas reduzidas aceleram o processo de desgaste devido ao esforço e atrito sobre a aresta de corte.

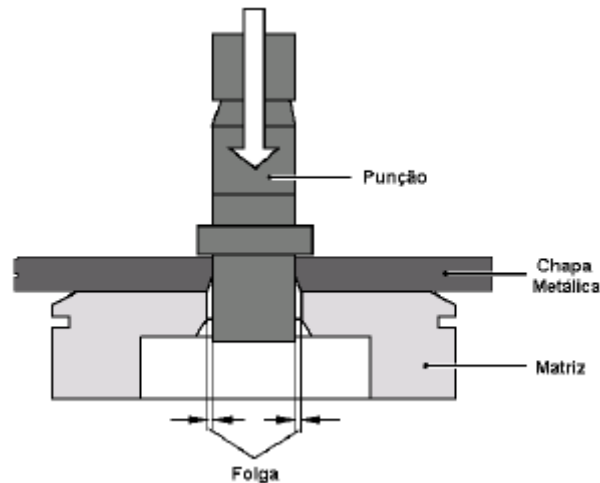


Figura 20 - Representação da folga entre o punção e a matriz [9]

O processo de corte inicia-se nas arestas de corte do punção e matriz. Se a folga for devidamente dimensionada, as linhas de rutura provenientes das duas arestas encontrar-se-ão. Se a folga for demasiado pequena, as duas linhas de rutura não se encontram, e assim ocorre um corte secundário, também denominado por dupla fractura. Quando a folga é excessiva, dará lugar a rebarbas originadas pela aresta da matriz, quando não encontra o ponto de fratura. Desta forma, criam-se pontos de tensão na chapa, levando à fratura prematura com grandes deformações plásticas, baixa quantidade de material cortado e grande quantidade de material arrancado.

Quando a dimensão de uma folga é a correcta, é possível o corte e geometria da chapa mais precisos. A deformação que acontece no início do processo é mínima, possibilitando um maior cisalhamento do material e um menor efeito de arrancamento no final do processo. Para que isto seja possível, é necessário garantir que as ferramentas estão em boas condições de afiamento, ferramentas construídas em material menos susceptível ao desgaste e maior esforço no processo de corte.

A folga radial “J” é a medida entre as paredes do punção e da matriz num ponto do contorno e, normalmente, é seleccionada como uma percentagem da espessura da chapa. Segundo Rossi [10], esta folga pode variar entre 5% e 13% da espessura da chapa.

Na Figura 21 pode observar-se um diagrama que propõem um modelo para a determinação do valor da folga para diferentes materiais e espessuras.

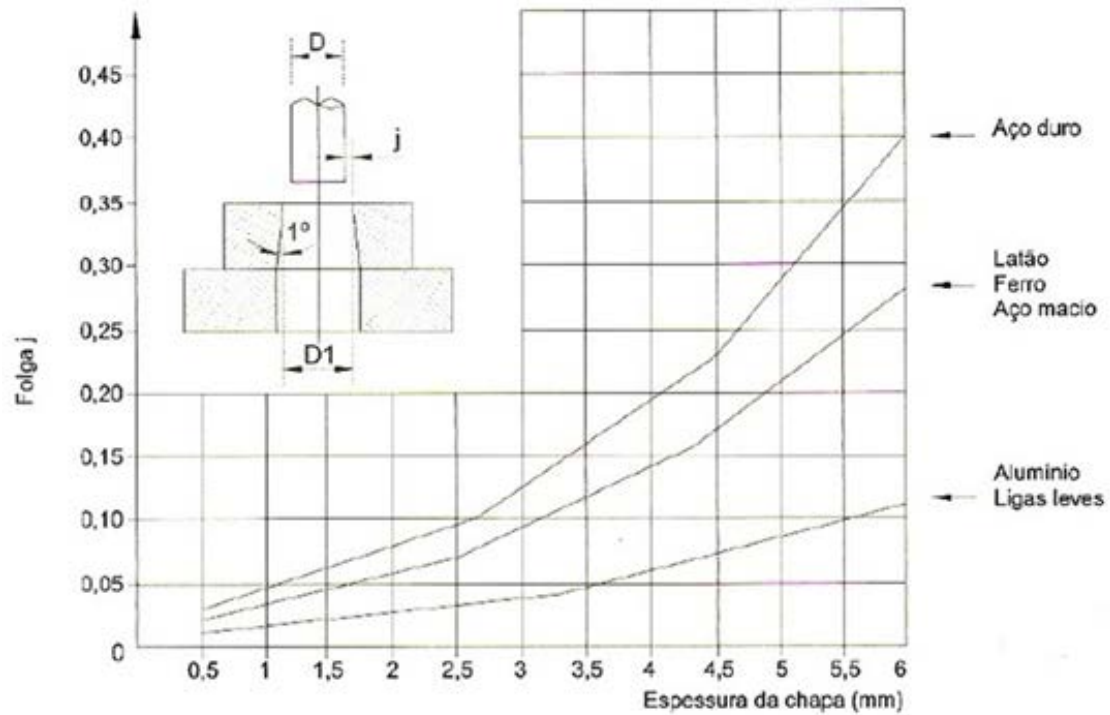


Figura 21 – Determinação da folga entre a matriz e o punção em função da espessura e do material [10]

Na verdade, a determinação da folga óptima encerra em si um processo bastante mais complexo. A folga exerce influência sobre a chapa cortada, conforme é apresentado na Tabela 6.

A Tabela 7 apresenta valores recomendados de folga para diferentes resistências ao corte e espessuras de chapa [8-12].

Tabela 6 – Efeito da folga de corte sobre as características da parede interior do furo [10]

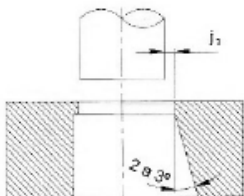
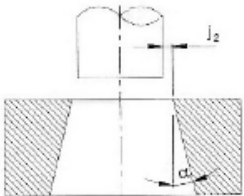
Folga grande				Folga pequena
Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
$\alpha = 14 \text{ a } 16^\circ$ $\rho = 10 \text{ a } 20 \%e$ $\gamma = 10 \text{ a } 20 \%e^{(2)}$ $\delta = 70 \text{ a } 80 \%e$	$\alpha = 8 \text{ a } 11^\circ$ $\rho = 8 \text{ a } 10 \%e$ $\gamma = 15 \text{ a } 25 \%e$ $\delta = 60 \text{ a } 75 \%e$	$\alpha = 7 \text{ a } 11^\circ$ $\rho = 6 \text{ a } 8 \%e$ $\gamma = 25 \text{ a } 40 \%e$ $\delta = 50 \text{ a } 60 \%e$	$\alpha = 6 \text{ a } 11^\circ$ $\rho = 4 \text{ a } 7 \%e$ $\gamma = 35 \text{ a } 55 \%e^{(3)}$ $\delta = 35 \text{ a } 50 \%e^{(5)}$	$\rho = 2 \text{ a } 5 \%e$ $\gamma = 50 \text{ a } 70 \%e^{(4)}$ $\delta = 25 \text{ a } 45 \%e^{(6)}$
Rebarba alta	Rebarba norma	Rebarba normal	Rebarba média	Rebarba alta
<p>Notação</p> $\delta$ = zona de ruptura $\alpha$ = ângulo de ruptura $\rho$ = raio de corte (1) $\gamma$ = zona lisa (1) $\beta$ = rebarba		<p>(1) <math>\rho + \gamma</math> penetração do punção antes da ruptura                      (2) <math>\gamma</math> pode ser pequeno, irregular ou ausente                      (3) Com marcas secundárias de corte                      (4) Duas zonas lisas separadas por uma zona de ruptura                      (5) Com superfície rugosa                      (6) Duas zonas rasgadas separadas por uma zona lisa</p>		

Folga entre punção e matriz para diferentes metais nos cinco casos

Metais trabalhados	Folga radial em % da espessura				
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Aço baixo teor carbono	21 max	11,5 a 12,5	8 a 9	5 a 7	1 a 2
Aço carbonado	25 max	17 a 19	14 a 16	11 a 13	2,5 a 5
Aço inoxidável	23 max	12,5 a 13,5	9 a 11	3 a 5	1 a 2
Ligas de alumínio					
Rt < 23daN/mm <sup>2</sup>	17 max	8 a 10	6 a 8	2 a 4	0,5 a 1
Rt > 23daN/mm <sup>2</sup>	20 max	15,5 a 14	9 a 10	5 a 6	0,5 a 1
Latão recozido	21 max	8 a 10	6 a 8	2 a 3	0,5 a 1
Latão meio duro	24 max	9 a 11	6 a 8	3 a 5	0,5 a 1,5
Bronze fosforoso	25 max	12,5 a 13,5	10 a 12	3,5 a 5	1,5 a 2,5
Cobre recozido	25 max	8 a 10	5 a 7	2 a 4	0,5 a 1
Cobre meio duro	25 max	9 a 11	6 a 8	3 a 5	1 a 2
Chumbo	22 max	8 a 10	6,5 a 7,5	4 a 6	0,5 a 2,5
Ligas magnésio	16 max	5 a 7	3,5 a 4,5	1,5 a 2,5	0,5 a 1

Tabela 7 – Folha de corte recomendada para diferentes resistências ao corte e espessura de chapas [10]

Espessura da chapa (mm)	Folga de corte (mm)							
	$j_1$				$j_2$			
	$R_c < 245$	$250 < R_c < 390$	$400 < R_c < 590$	$R_c < 590$	$R_c < 250$	$250 < R_c < 400$	$400 < R_c < 600$	$R_c < 600$
0,1	0,003	0,004	0,005	0,006	0,002	0,003	0,004	0,005
0,2	0,006	0,008	0,010	0,012	0,003	0,005	0,007	0,01
0,3	0,009	0,012	0,015	0,018	0,005	0,008	0,008	0,015
0,4								
0,5	0,015	0,02	0,025	0,03	0,01	0,015	0,015	0,025
0,5								
0,7								
0,8	0,025	0,03	0,04	0,05	0,015	0,02	0,02	0,04
0,9								
1	0,03	0,04	0,05	0,06	0,02	0,03	0,03	0,05
1,5	0,05	0,06	0,08	0,09	Rc - Resistência ao Corte (MPa)			
2		0,08	0,10	0,12				
2,5	0,08	0,10	0,13	0,15				
3		0,12	0,15	0,18				
3,5	0,10	0,14	0,18	0,21				
4	0,12	0,16	0,20	0,24				
4,5	0,14	0,18	0,22	0,27				
5	0,16	0,20	0,25	0,30				

### 2.3 Revestimentos para ferramentas

Na última década, a forma mais adequada para melhorar o contacto entre punções, matrizes e produto, tem sido o uso de revestimentos finos realizados por PVD (Physical Vapour Deposition) e CVD (Chemical Vapour Deposition) sobre as superfícies da ferramenta, tentando diminuir o atrito e o desgaste [13]. Dependendo da folha metálica e das condições de trabalho, vários revestimentos foram testados utilizando as mais diversas situações de contacto e parâmetros de fabrico.

Bressan *et al.* [14] desenvolveu estudos sobre o revestimento  $\text{Al}_2\text{O}_3$  realizado através de MOCVD (*Metalorganic Chemical Vapour Deposition*) em três substratos de aço diferentes, normalmente utilizados nas ferramentas de estampagem, nomeadamente aços AISI M2, AISI D6 e AISI 52100. Utilizando o teste pino em disco para avaliar a resistência ao desgaste, o autor concluiu os aços M2 e D6 nitrurados, revestidos com  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , apresentaram melhor desempenho em termos de resistência ao desgaste para ferramentas de estampagem de trabalho a frio. Vera *et al.* [15] também testou três substratos diferentes de aço (AISI 4320, AISI 8620 e AISI 4140) fornecidos com os revestimentos CrN, TiN e WC/C, obtidos pelo processo PVD a fim de avaliar o coeficiente de atrito e taxa de desgaste sob condições de contacto a seco à temperatura ambiente. O autor concluiu que o revestimento WC/C foi o que apresentou melhor desempenho na resistência ao desgaste e o coeficiente de atrito mais coerente nas duas cargas distintas que foram utilizadas nos ensaios. Por sua vez, Clarysse *et al.* [16] estudou três revestimentos diferentes obtidos pelo processo de PVD, o convencional CrN, um revestimento bem estabelecido com marca comercial Balinit C (WC/C) e a nova geração de revestimentos compostos TiN/MoST. Relativamente aos testes laboratoriais, o pior comportamento demonstrado foi observado pelo CrN, e o revestimento com melhor performance foi o WC/C. Algumas configurações diferentes foram utilizadas a fim de se explorar as suas potencialidades, chegando-se à conclusão de que o sistema composto DLC + WC/C é o que tem melhor desempenho, quando comparado com outros sistemas de WC/C, como o triplex WC/C ou WC puro. Contudo, também o sistema triplex WC/C apresentou resultados promissores. Ghiotti & Bruschi *et al.* [17] também estudaram o comportamento do revestimento DLC na tentativa de melhoria do desgaste, tanto abrasivo como adesivo em ferramentas de conformação, fazendo a comparação com três outros revestimentos bem conhecidos (CrN + DLC, CrN e TiAlN) obtidos pelo processo PVD. Nestes revestimentos, foram realizados os testes a seco e lubrificados, permitindo assim avaliar as possíveis diferenças de comportamento em função das condições de contacto. Testes de pino em disco foram também executados para caracterizar o comportamento dos revestimentos ao desgaste e o ensaio *scratch* foi utilizado para avaliar a adesão do revestimento ao substrato, considerando que é uma das propriedades mais importantes para garantir os resultados desejados no que respeita à resistência ao desgaste. Efectivamente, considerando os quatro revestimentos testados, o revestimento CrN + DLC apresentou melhor desempenho na resistência ao desgaste, enquanto que o revestimento TiAlN apresenta o pior. É de salientar o excelente comportamento do revestimento DLC ao atrito em condições de contacto seco. Salgueiredo *et al.* [18] investigou o desgaste erosivo de revestimentos mono-, bi- e multicamada de compósitos de diamante, utilizando a técnica de deposição química de vapor por filamento quente (HFCVD - *Hot-Filament Chemical Vapour Deposition*). Foi feito um estudo inicial sobre o efeito do pré-tratamento superficial sobre os substratos de nitreto de silício, que revelaram que o tratamento mecânico de polimento plano, combinado com a corrosão química com plasma  $\text{CF}_4$ , é a melhor preparação de superfície para alcançar altos níveis de adesão. Os filmes foram projectados para que combinassem a excelente adesão do diamante

microcristalino (MCD – *Micro-Crystalline Diamond*) com uma camada superior de diamante nanocristalino (NCD – *Nano-Crystalline Diamond*) para redução da rugosidade superficial. Os autores verificaram que, de facto, os revestimentos de diamante multicamada revelaram a melhor resistência erosiva, cujo dano ocorreu pelo destacamento gradual do material da camada externa, após um longo tempo de teste.

Quanto às aplicações de estampagem, Zeng *et al.* [19] testou o revestimento CrTiN, filmes multicamada de TiN/NbN e o revestimento multicamada de diferentes carbonetos depositados sobre aço SKH51, usado habitualmente em punções, utilizando um reactor PVD. Os resultados obtidos permitiram concluir que todos os revestimentos utilizados permitiram aumentar drasticamente a resistência ao desgaste e desempenho durante a estampagem, embora os revestimentos CrTiN apresentem resultados excepcionais devido a sua elevada dureza, boa adesão entre o substrato e os filmes, e um moderado coeficiente de atrito. Podgornik *et al.* [20] realizou testes a fim de avaliar as melhorias alcançadas pela aplicação de revestimentos duros pela técnica PVD em ferramentas de estampagem e corte, analisando também o atrito em relação a estas operações. Os resultados obtidos mostraram que os revestimentos duros possibilitam melhorar a resistência ao desgaste e ao atrito, mesmo quando são utilizados aços macios como substrato. No entanto, a preparação do substrato e uma boa adesão entre revestimentos e substratos, são determinantes. No seguimento destes testes, o mesmo autor conclui que, mesmo usando revestimentos de baixo atrito, como o DLC em condições de contacto seco, é ultrapassada a força de estampagem crítica, conduzindo assim à falha da ferramenta. Desta forma, conclui igualmente que as operações de estampagem e corte não são viáveis sem recurso a lubrificantes. Neste estudo, foram analisados os revestimentos AlCrN, TiCN e Me-DLC depositados com recurso à técnica de PVD. Ghiotti *et al.* [21], num estudo mais recente, testou o aço 22MnB5 revestido com AlSi e Zn em processos de estampagem a quente, utilizado na indústria automóvel. Os testes utilizados para avaliar o coeficiente de atrito e o desgaste usaram temperaturas entre 600°C e 800°C, com o objectivo de reproduzir as condições reais de trabalho utilizado no processo de estampagem do aço em estudo. O coeficiente de atrito mais baixo foi obtido com o revestimento Zn, embora, no que respeita ao comportamento ao desgaste, ambos os revestimentos tivessem mostrado um elevado desempenho, levando à conclusão que os fenómenos de adesão e abrasão se foram manifestando vagamente. Outra conclusão importante extraída deste estudo, foi o facto destes revestimentos apresentarem piores desempenhos quando os testes são realizados a temperaturas inferiores. As aplicações do processo de estampagem a quente, que utilizam o aço ao boro 22MnB5, fornecido galvanizado com revestimento de Al-Si obtido por imersão a quente, foram estudadas por Vilaseca *et al.* [22], utilizando os revestimentos AlCrN (punção) e CrN (matriz), assim como outros pares de ferramentas não revestidas (punção e matriz). Os testes foram realizados usando uma prensa de 30 t, em que as placas foram aquecidas a 900°C durante 7 minutos. O desgaste adesivo foi o principal mecanismo de acção nas placas Usibor<sup>®</sup> AlSi, simultaneamente se verifica, um crescimento do tamanho dos aglomerados. O par AlCrN (punção) e CrN (matriz) apresentou um melhor

comportamento à adesão que o par Usibor® AISi não revestido, não se tendo observado fendas ou destacamentos nos revestimentos. Uma conclusão importante retirada deste estudo relaciona-se com a importância da posição da ferramenta, sendo que a adesão é mais elevada na ferramenta (punção ou matriz) localizada do lado inferior da secção da prensa, devido à acumulação de pó Al/Si por gravidade, originado durante o processamento das placas. Este material foi também explorado por Ghiotti *et al.* [23] (aço ao boro 22MnB5 fornecido galvanizado com revestimento Al-Si obtido por imersão a quente), mas desta vez utilizando ferramentas não revestidas, construídas com duas classes diferentes de aço de alta condutividade térmica, com diferentes agregações de molibdénio na matriz do aço, HTCS1 e HTCS3, concluindo o que anteriormente foi afirmado nesta introdução: quanto maior a temperatura de trabalho, menores os coeficientes de atrito medidos. O comportamento dos dois aços foi muito semelhante. Komarov *et al.* [24] estudou o efeito de pré-endurecimento do substrato de aço revestido com TiN e TiAlN depositados em diferentes condições de tratamento da superfície. O autor verificou que a carbonitruração melhorou a microdureza (7 vezes), a resistência ao desgaste da superfície de trabalho (2,3 vezes), assim como a resiliência do revestimento composto (4,5 vezes), permitindo prever que é possível reduzir a espessura do revestimento sem perda de desempenho do filme. Concluiu igualmente que a carbonitruração melhora claramente a dureza do revestimento e a adesão entre substrato e revestimento.

Muitos outros estudos têm sido realizados a fim de melhorar o processo de estampagem, bem como o coeficiente de atrito entre a ferramenta e a chapa a ser processada, assim como a resistência ao desgaste do punção e matriz [25].

## 2.4 Revestimentos utilizados neste trabalho

### 2.4.1 CrCN - Carbonitreto de crómio

Silva *et al.* [26] fez caracterização laboratorial de um filme depositado por PVD constituído por três diferentes camadas: CrN na parte inferior, CrCN na camada intermédia e DLC na camada superior. Foram utilizadas técnicas de análise como o SEM, EDS, AFM e difracção de raios-X (XRD). Os testes experimentais foram desenvolvidos com o objectivo de permitir entender se o filme em estudo se adequaria a cavidades de moldes de injeção de polipropileno reforçado com 30% (em peso) de fibras de vidro para peças automóveis, uma vez que este composto é extremamente abrasivo. Isto significa um desafio para a resistência ao desgaste da superfície. Os resultados dos testes revelaram que após 135.000 ciclos de injeção, o revestimento em estudo melhorou significativamente o desempenho previamente revelado por amostras não revestidas. Estes resultados alcançados por este filme podem ser parcialmente atribuídos à camada superior de DLC e ao seu baixo coeficiente de atrito.

Pengfei *et al.* [27], estudou a influência do carbono nas propriedades tribológicas do revestimento CrCN, através da preparação de revestimentos depositados em substratos de silício monocristalino e de aço rápido AISI M2 (HSS) com diferentes teores em carbono. Utilizando configurações do tipo pino-em-disco, foram medidos os coeficientes de atrito e analisados os modos de falha por meio de microscópio óptico. As análises revelaram que o revestimento exibe uma estrutura colunar densa e quando é adicionado carbono aos revestimentos, estes passam de um estado cristalino para o estado amorfo. Os resultados dos ensaios mostraram que os revestimentos CrCN possuem menor coeficiente de atrito e uma excelente resistência ao desgaste, comparativamente ao revestimento CrN. Este comportamento poderá ser motivado pela fase de grafite e estrutura multicamada, que podem formar filmes durante o contacto e assim reduzir o coeficiente de atrito.

#### 2.4.2 WC - Carboneto de tungstênio

Wänstrand *et al.* [28] analisou as propriedades mecânicas e tribológicas de cinco revestimentos diferentes de WC/C depositados por PVD em aço rápido (HSS), comparando as suas propriedades com as do revestimento de TiN. A primeira camada depositada foi de crómio, de forma a aumentar a adesão dos revestimentos ao substrato. Todos os revestimentos apresentaram uma espessura entre 2 a 4  $\mu\text{m}$ , uma rugosidade superficial na faixa de 10 a 70 nm e, uma dureza entre 1500 e 1800 HV. O *scratch-test* revelou uma excelente adesão entre substrato e revestimento, e a resistência ao desgaste abrasivo exibida esteve ao nível da patenteada pelo revestimento TiN. De uma forma geral, as melhores propriedades mecânicas e tribológicas são obtidas quanto menos espessa for a camada de crómio depositada, assim como, quando o revestimento WC/C é depositado utilizando um elevado fluxo de acetileno.

Outros estudos foram também desenvolvidos na caracterização do carboneto de tungstênio, na sua aplicação como revestimento. Voevodin *et al.* [29] investigou o desempenho tribológico e termoquímico dos revestimentos depositados a vácuo WC/DLC amorfo. A composição química do revestimento foi alterada pela variação do teor em carbono entre os 30% e os 90%. Os autores concluíram que a microestrutura influenciou criticamente a dureza e as propriedades tribológicas dos revestimentos WC/DLC. Os revestimentos cristalizados com WC apresentam uma dureza mais baixa (15 GPa), quando comparados aos revestimentos mais duros (26 GPa) com nanocristais de WC maiores. A leitura dos fotoelectrões na análise XPS foi realizada em filmes depositados na superfície de esferas de aço, usadas contra os revestimentos WC/DLC, no tribómetro Plint, com uma configuração de esfera em disco, em condições de ar húmido e azoto seco. Ambos formaram óxidos e grafite, funcionando como lubrificante sólido. A elevada dureza e a propriedade auto-lubrificante dos compósitos de WC resultaram em baixas taxas de desgaste e coeficientes de atrito de cerca de 0,2.

### 2.4.3 B<sub>4</sub>C - Carboneto de Boro

Ahna *et al.* [30] estudou as propriedades tribológicas do revestimento carboneto de boro (B<sub>4</sub>C) influenciadas pela adição de várias quantidades de metano (CH<sub>4</sub>) durante o processo de deposição de pulverização catódica por magnetron (*DC magnetron Sputtering*) utilizando uma esfera de aço como *contra-face*. O autor realizou testes de desgaste e estudou as características químicas dos revestimentos e superfícies desgastadas, utilizando espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios-x (XPS) e espectroscopia eléctrica Auger (AES). Foi possível concluir que a adição do gás CH<sub>4</sub> ao gás de deposição (Ar<sup>+</sup>), afectou fortemente as propriedades tribológicas do revestimento. O coeficiente de atrito foi reduzido aproximadamente de 0,4 para 0,1 e a resistência ao desgaste foi significativamente melhorada com o aumento da proporção do gás metano de 0 para 1,2% em volume.

Eckardt *et al.* [31] investigou as alterações no coeficiente de atrito do revestimento B<sub>4</sub>C, pela adição de pequenas quantidades de acetileno no processo de deposição (*d.c. magnetron sputter*). A adição do gás proporcionou uma redução de dureza, mas também a redução do coeficiente de atrito de 0.8 para 0.2. Os resultados indicam que a adição do acetileno ao revestimento leva a mudanças estruturais, introduzindo ligações adicionais como B-H e C-H, resultando malhas menos rígidas, conduzindo ao comportamento tribológico observado.

Estudos de desgaste foram desenvolvidos por Larsson *et al.* [32] em superfícies acopladas revestidas com o filme B<sub>4</sub>C. Os estudos conduziram a conclusão de que o filme B<sub>4</sub>C forma tribofilmes de óxidos que contribuem para a diminuição das taxas de desgaste e suavização das tribosuperfícies no decorrer do teste e consequente aumento de distância percorrida.

### 2.4.4 Mo – Molibdénio

Wei *et al.* [33] desenvolveu os seus estudos sobre as propriedades tribológicas de revestimentos cerâmicos modificados por filmes de molibdénio (Mo) em contacto com Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, sob condições lubrificadas a temperatura ambiente. Os filmes de Mo foram depositados por mistura de feixes de iões. Como resultado, os filmes de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e WC revestidos com Mo, apresentaram melhor comportamento no deslizamento a seco, atrito e menor desgaste, comparativamente com filmes não revestidos. Os resultados revelaram que os lubrificantes sólidos podem, efectivamente, reduzir o atrito e desgaste. Não se verificou desgaste mensurável para os revestimentos lubrificadas, tanto por películas de Mo, quanto por óleos lubrificantes.

Zhao *et al.* [34] caracterizou as microestruturas do pó e revestimento à base de Mo. O revestimento nanocristalino amorfo com base em Mo foi depositado na superfície de substratos aço carbono por pulverização, por plasma. Os resultados indicaram que o revestimento com base em Mo era composto principalmente de fases  $Fe_{0.54}Mo_{0.73}$ ,  $Fe_3Mo$ ,  $Cr_9Mo_{21}Ni_{20}$ ,  $Fe_3B$  e  $Cr_{0.46}Mo_{0.4}Si_{0.14}$ . O tamanho médio do grão do revestimento com base em Mo foi de 22 nm a 32 nm, apresentando uma estrutura em camadas densas com espessura aproximada de 250  $\mu m$ . A dureza superficial do revestimento foi de 9,2 GPa, oito vezes superior à do substrato. Os coeficientes de atrito diminuíram linearmente com o aumento de carga ou velocidade linear. Tanto o coeficiente de atrito como a perda de massa do revestimento, foram muito superiores no substrato. O revestimento de base em Mo apresentou excelente resistência ao desgaste em condições de deslizamento a seco, comparativamente ao aço carbono.

#### 2.4.5 TiAlN – Nitreto de titânio alumínio

Tomaszewski *et al.* [35] investigou a influência na resistência ao desgaste de revestimentos de nitreto de titânio alumínio (TiAlN) modificado pela adição de molibdénio. Foi obtido um revestimento multi-camada com um teor médio de Mo de 8%. A adição do Mo resultou numa melhoria significativa das propriedades tribológicas, as quais se manifestaram pela redução do coeficiente atrito de 0,8 para 0,5 relativamente ao aço, e taxa de desgaste abaixo de  $10^{-15}$  a  $15^{-15}$   $m^3/Nm$ . A mudança observada no comportamento tribológico foi interpretada como sendo causada pela contribuição dos óxidos de molibdénio gerados no contacto, durante o ensaio de esfera em disco. A adição do molibdénio também afectou a resistência à corrosão, melhorando a resistência ao fenómeno de 'pitting'. Isto resulta num aumento do potencial de corrosão medido em revestimentos de base TiAlN em solução de NaCl. Esta tendência está relacionada com a melhor capacidade de passivação do revestimento contendo Mo na sua estrutura.

Ipaz *et al.* [36] investigou formas de melhoria das propriedades mecânicas e tribológicas do aço nº 1.2080, revestido com um sistema multi-camada  $[Ti-Al/Ti-Al-N]_n$  com diferentes períodos (passo) a cada duas diferentes camadas. Foi observado um aumento da dureza e módulo de elasticidade até 29 GPa e 260 GPa, respectivamente, quando o passo nos revestimentos foi diminuído. A amostra com um passo de 25 nm e um número de bicamadas de  $n=100$  apresentaram o menor coeficiente de atrito ( $\sim 0,28$ ) e a maior carga crítica (45 N), correspondendo a 2,7 e 1,5 vezes melhor, respectivamente, que os valores para o revestimento depositado com  $n=1$ . Os autores verificaram que estes resultados significaram uma melhoria das propriedades mecânicas, tribológicas e de adesão, comparando os sistemas multicamada  $[Ti-Al / Ti-Al-N]_n$  com uma bicamada a 26%, 63% e 33%, respectivamente.

## 2.5 Técnicas e métodos de análise dos revestimentos

Numa primeira fase, será importante definir o que se entende por revestimento. Este caracteriza-se como sendo uma película fina, com uma espessura normalmente compreendida entre os micrómetros ( $10^{-6} m$ ) e os nanómetros ( $10^{-9} m$ ), que se encontra na superfície de um substrato. A importância dos filmes finos prende-se com a exigência das propriedades necessárias às aplicações de engenharia, em que as características da superfície terão de ser diferentes do substrato. É assim possível utilizar filmes finos que melhorem as propriedades químicas, físicas e mecânicas, como por exemplo, aumento da dureza, aumento da resistência à corrosão e ao desgaste, permitindo aumentar a vida útil do substrato.

### 2.5.1 Técnica de deposição do revestimento – PVD (*Physical Vapour Deposition*)

Os filmes finos obtidos com recurso a técnicas PVD requerem uma atmosfera em vácuo. O objectivo será minimizar a introdução de contaminações no filme durante a deposição, contaminações que estão presentes na atmosfera à pressão normal. Visa também minimizar a interferência com as partículas que são projectadas do alvo contra o substrato.

O processo de deposição inicia-se pela vaporização ou excitação na forma de átomos ou moléculas de um material (normalmente designado por alvo), sendo transferido para o substrato sob a forma de vapor numa atmosfera de baixa pressão, onde condensa. Existem dois tipos de processos de deposição PVD: evaporação e pulverização catódica, este último utilizado na deposição dos filmes finos em estudo.

Na pulverização catódica, o material de um alvo é bombardeado por partículas energéticas (neste caso iões), provocando o arranque de átomos deste. É aplicado um potencial negativo no alvo, enquanto a câmara se encontra em vácuo e ligada a uma fonte de tensão positiva. Assim, acontece uma descarga elétrica que ioniza um gás inerte (normalmente argon), que é enviado para o interior da câmara. O gás é projetado para a superfície do alvo, removendo material deste e, parte dos átomos removidos são projectados para o substrato, onde condensam, dando-se início ao crescimento do filme [37].

### 2.5.2 Microscopia Electrónica de Varrimento (SEM - *Scanning Electron Microscopy*)

O método de análise de microscopia electrónica de varrimento (MEV) possibilita a análise da morfologia e topografia dos substratos. A técnica utiliza feixes de electrões que incidem sobre a superfície das amostras para formar uma imagem. Durante a análise, ocorre um conjunto de interações, das quais resultam emissões de electrões retrodifundidos e secundários, que são recolhidos por detectores. Os electrões secundários indicam a topografia, enquanto os retrodifundidos fornecem o contraste na imagem, dando a indicação das diferenças de composição química [38].

### 2.5.3 Espectroscopia de raios-x por dispersão de energia – EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*)

Esta técnica caracteriza-se pela microanálise química de materiais, usada em conjunto com a microscopia electrónica de varrimento. A técnica EDS detecta os raios-x emitidos a partir da amostra, resultantes do bombardeamento por um feixe de electrões, como forma de caracterização da composição elementar do volume analisado. Quando a amostra é bombardeada pelo feixe de electrões do SEM, estes são ejectados dos átomos que compõem a superfície da amostra. As falhas resultantes são preenchidas por electrões de um estado mais elevado e um raio-x é emitido para equilibrar a diferença de energia entre o estado dos dois electrões. A energia emitida será característica do elemento do qual foi emitida. O detector de raios-X EDS mede a abundância relativa de raios-X emitidos *versus* a sua energia [39].

### 2.5.4 Microscopia de força atómica – (AFM – *Atomic Force Microscopy*)

A microscopia de força atómica é uma técnica utilizada para caracterizar a superfície dos materiais. O AFM, composto por uma 'viga' (*cantilever*) que na sua extremidade possui uma sonda, faz a interacção com a superfície da amostra a ser analisada.

O princípio do AFM (Figura 22) é a medição das deflexões da viga, que representam as forças de interacção entre os átomos da sonda e os da superfície da amostra. Estas dependem da natureza da amostra e da extremidade da viga, da distância entre elas, da geometria da extremidade e de contaminações a que a superfície da amostra esteja sujeita. As forças de deflexão são causadas na sua maioria pelas forças de van der Waals entre a ponta e a amostra. Além desta, actuam também forças menores (magnéticas e coulombianas). A sonda faz o varrimento de uma determinada área da superfície da amostra, permitindo a medição de um conjunto de pontos, e a combinação desses dados fornece uma imagem topográfica dessa superfície [40-41].

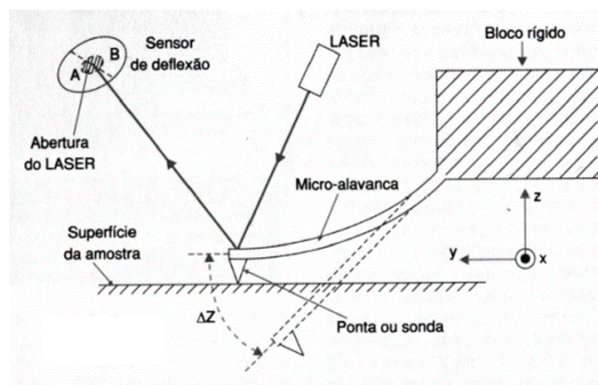


Figura 22 – Princípio de funcionamento do AFM [30]

### 2.5.5 Rugosidade

O método mais comum de avaliar a rugosidade é através de um perfilômetro. O princípio de funcionamento baseia-se na deslocação de uma agulha sobre a superfície a analisar, segundo uma velocidade constante. Atendendo a que a agulha se desloca, os movimentos verticais são amplificados através de um transdutor que converte a sua coordenada em ZZ' em tensão, seguido de um amplificador que facilita a digitalização da voltagem, e um conversor analógico-digital ligado a um computador. A ponta desta agulha é constituída por diamante de perfil calibrado. Informação mais detalhada sobre os parâmetros selecionados pode ser encontrada no ANEXO 1 - Perfilometria.

### 2.5.6 Microdureza

A dureza de um material pode ser definida pela resistência oferecida pelo mesmo à penetração ou deformação permanente. O ensaio caracteriza-se pela aplicação de uma carga sobre a superfície do material, por meio de um indentador. Quanto mais duro for o material, menos profunda será a marca deixada pelo indentador. Existem vários tipos de ensaios para a determinação da dureza. A análise com penetrador Vickers possui maior precisão de resultados, sendo o mais utilizado neste tipo de análises, pelo que a escolha recaiu sobre este tipo de penetrador [42].

### 2.5.7 Adesão (Indentação e scratch)

A indentação Rockwell é um dos métodos mais utilizados pelos investigadores, para avaliar a adesão dos filmes PVD ao substrato. Este método de indentação é descrito na norma VDI 3198:1991 [43], como sendo um teste de qualidade destrutivo para substratos revestidos. O método de avaliação dos modos de falha pode ser observado na Figura 23. Um indentador cónico de diamante penetra a superfície do filme de revestimento, induzindo uma deformação plástica massiva ao revestimento. Como é sabido, a profundidade da indentação não deverá ser superior a 10% da espessura do revestimento, evitando desta forma a influência do substrato [44-46].

O teste scratch é, também, amplamente utilizado como técnica de avaliação da adesão de revestimentos. Neste método, um indentador aplica uma carga progressiva numa superfície revestida até ocorrer a remoção do revestimento. Esta carga crítica é considerada uma medida de adesão. É também uma técnica rápida e os resultados reproduzíveis [35].

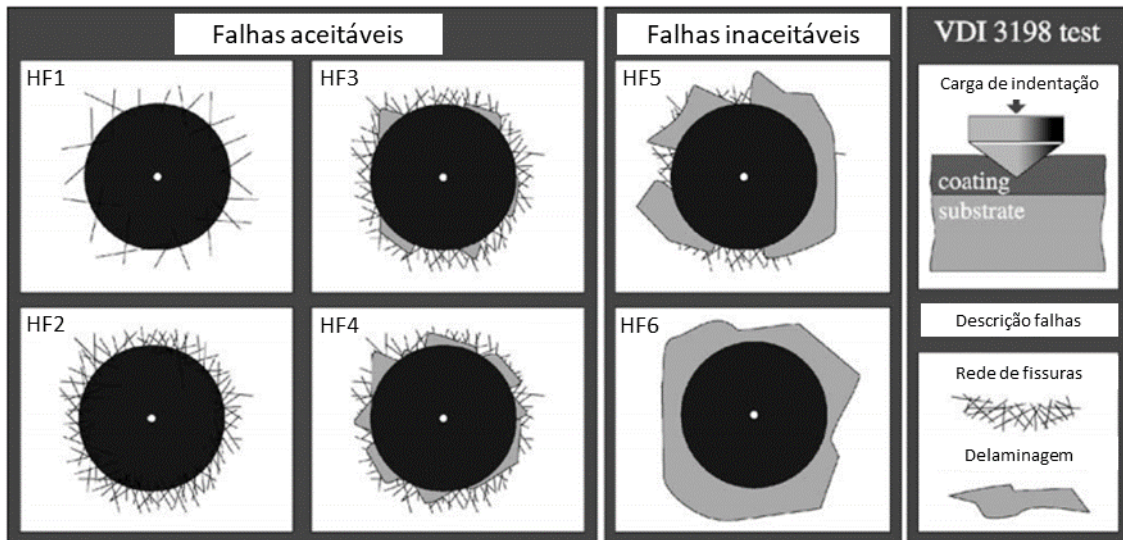


Figura 23 – Classes de qualidade da adesão de acordo com a norma VDI 3198:1991 [43]

# DESENVOLVIMENTO

- 3.1. Caracterização da empresa
- 3.2. Caracterização do problema
- 3.3. Descrição dos equipamentos e métodos de análise do revestimento
- 3.4. Desenvolvimento de novos revestimentos



### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Caracterização empresa

A Colep foi fundada em 1965 no dia 1 de Abril em Vale de Cambra, tendo a sua designação origem no nome do seu fundador, Ilídio Costa Leite Pinho. Pertence hoje ao Grupo RAR, e está atualmente presente em quase todos continentes (Figura 24).



Figura 24 - Instalações da Colep Portugal

A Colep é líder global nas embalagens de bens de consumo nas unidades de *Packaging* e *Contract Manufacturing*. Possui um volume de negócios de cerca de 500 milhões de euros, emprega 3850 pessoas em Portugal, Brasil, Alemanha, México, Polónia, Espanha, Emirados Árabes Unidos e Reino Unido.



Figura 25 - Instalação da Colep no Mundo [46]

## História

Em 1965 a Colep é fundada em Vale de Cambra, focando a sua atividade na produção de embalagens metálicas. Dez anos mais tarde, estende a sua área de negócio ao *Contract Manufacturing* e em 1982 começa a usar tecnologia de moldagem por sopro para a produção de embalagens de plástico.

Por questões estratégicas, o conselho de Administração decide-se por investimentos fora do País e, em 1993, adquire a empresa S.C. Johnson's em Espanha, passando a designar-se *COLEP ESPAÑA - Embalajes y Productos Envasados, S.A.*, cuja atividade integra a área do *Contract Filling* (Enchimento). No seguimento desta estratégia, seis anos mais tarde adquire a empresa Shirley Jones & Associates, com sede em Londres, com o objetivo de criar bases comerciais no Reino Unido.

Em 2001 o grupo RAR, através de oferta pública, adquire o capital da Colep e, um ano depois, inicia atividade na Polónia, com a construção de uma nova fábrica concebida de raiz para o *Contract Manufacturing*.

Três anos mais tarde dá-se a fusão entre a Colep e a *Custom Manufacturing* da CCL, dando origem a nova *joint-venture* ColepCCL, terminando esta em 2007 com a aquisição por parte do grupo RAR da totalidade do capital da ColepCCL.

Em 2010 torna-se parceira da empresa ZM Participação, SA, líder brasileiro de *Contract Manufacturing* de produtos de higiene pessoal e higiene doméstica e um ano mais tarde, no dia 1 de Julho, a ColepCCL muda o seu nome para Colep.

Em 2013 adquire a empresa *Aerosoles y Liquidos S.A.*, com sede em Santiago de Queretaro, México, dedicada ao *Contract Manufacturing* de aerossóis de produtos de higiene pessoal. Assina também, durante esse ano, uma parceria com o líder asiático de produção de bens de consumo, a One Asia. Inicia também uma *joint-venture* com a empresa Scitra, com sede nos Emirados Árabes Unidos.

A empresa fornece produtos nos segmentos: *Homecare*, produtos técnicos (ex: produtos para cuidados para carro), *Co-packing*, *Aerossois*, *General Line Packaging*, Impressão de FF, *Blow Moulding* e *Injection Moulding*.



Figura 26 – Cronograma histórico da Colep [46]

## 3.2 Caracterização do problema

Para o processo de estampagem, é normalmente necessária a utilização de lubrificantes. Os vestígios de lubrificante que ficam na superfície externa do tampo representam um problema para o cliente. Todo o trabalho desenvolvido teve como objectivo a redução, ou eventual eliminação do lubrificante durante o processo de estampagem de tampas para latas utilizadas na emalagem de bolachas.

### 3.2.1 Definição do produto

O âmbito deste trabalho centrou-se no estudo de um produto de *General Line*, nomeadamente, no processo de estampagem de tampas de embalagens metálicas para aplicação alimentar.



Figura 27 – Embalagem metálica de bolachas

### 3.2.2 Ferramenta

Os principais elementos da ferramenta de estampagem estão descritos na próxima imagem.

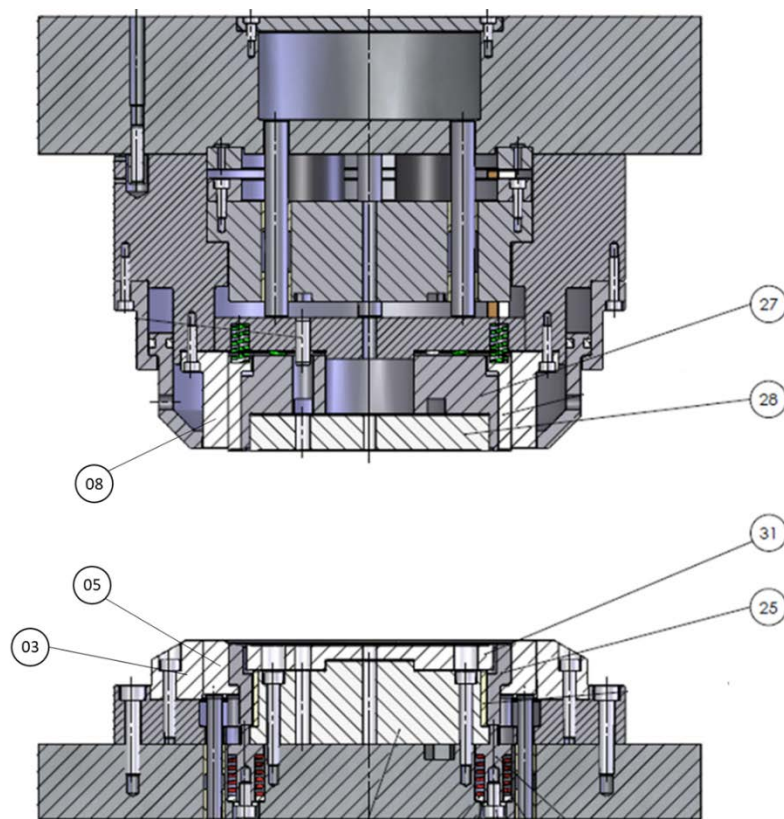


Figura 28 - Desenho de conjunto da ferramenta de estampagem

Tabela 8 – Descrição dos principais elementos da ferramenta de estampagem e respectivos aços usados

Número do elemento	Nomenclatura usual em Inglês	Descrição	Material	Dureza
03	Cuttingring	Matriz	1.3343	62-64 HRC
05	Pressure ring	Argola de pressão	1.1730	52-54 HRC
08	Cutting punch	Punção de corte	1.3344	62-64 HRC
25	Draw ring	Centro Inferior	1.2379	58-60 HRC
27	Upper draw core	Centro Superior	1.2379	58-60 HRC
28	Upper draw core insert	Postiço do centro superior	1.2842	58-60 HRC
31	Lower draw core insert	Postiço do centro inferior	1.2842	58-60 HRC

### 3.2.2.1 Aço ferramenta

A ferramenta que foi alvo de estudo e posteriormente revestida no âmbito deste trabalho, é centro inferior, identificado com o número 25 na Tabela 8, possuindo um diâmetro de 190,27 mm.

Na construção das ferramentas – matriz e punção – é utilizado o aço X155CrVMo12-1 (nº 1.2379). Este aço é normalmente utilizado em ferramentas para trabalho a frio, apresentando uma dureza média entre 60-62 HRC e um módulo de Young de 210 GPa. As várias designações deste aço são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Designações do aço 1.2379 segundo diversas normas [48]

Número	EURONORM	AISI	AFNOR	DIN	BS	AISI
1.2379	X160CrMoV12-1	D2	Z160CDV12	X155CrVMo12-1	BD 2	D2

O aço é entregue no estado recozido e temperado, e as suas propriedades mecânicas são indicadas pelo fornecedor. A composição química do aço é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Composição química do aço 1.2379 [49]

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
(wt. %)	1,45 -1,65	0,10 -0,40	0,15 – 0,50	11,00 – 13,00	0,60 – 0,90	0,70 – 1,00	0,030	0,003

Para um aço para trabalho a frio, entende-se que as condições de trabalho a que a ferramenta estará sujeita em trabalho, não ultrapassam a temperatura superficial de 200°C. Estes aços devem possuir características de forma a que suportem as solicitações a que irão ser sujeitos, necessitando de: elevada dureza, elevada resistência ao desgaste (abrasiva e adesiva), boa tenacidade, elevada resistência à compressão e ao choque, reduzida variação dimensional durante os tratamentos térmicos e maquinabilidade suficiente.

O ciclo de vida das ferramentas está dependente de factores como o tratamento térmico a que foram sujeitas, cuidados de manutenção e condições de trabalho, e estas influenciadas por parâmetros tais como: folga, lubrificação, velocidade, entre outros. A qualidade das peças produzidas indica normalmente o estado e a necessidade de retificação das ferramentas.

### 3.2.3 Folha Flandres (caracterização da folha – ensaios laboratório)

Para definir a matéria-prima em estudo, foi conduzida uma caracterização mecânica e química.

No processo de recepção do material na empresa, são realizados os ensaios de dureza, espessura do material e avaliação da gramagem (peso por unidade de área) do estanho na superfície. Na Tabela 11 são apresentados os dados recolhidos.

Tabela 11 – Mapa de controlo de características na recepção da folha flandres (\*S1: superfície 1, S2: superfície oposta ao S1)

Identificação do controlo			Dureza	Espessura	Revestimento Estanho	
Data Controlo	Fornecedor	Lote Fornecedor	HR	Micrometro	S1* g/m <sup>2</sup>	S2* g/m <sup>2</sup>
05/05/2015	Tata	470595C	71	0,151	2,65	2,63
05/05/2015	Tata	4700596A	72	0,151	2,65	2,69
28/05/2015	Tata	460971AP	53	0,152	2,23	2,56
28/05/2015	Tata	460970B	71	0,148	2,81	2,66
07/08/2015	Arcelor	5074P064	70	0,150	2,66	2,67
21/08/2015	Arcelor	5118K016	68	0,150	2,38	2,73
02/09/2016	Arcelor	5124P029	70	0,148	2,07	2,32
02/09/2015	Arcelor	5093K030	70	0,152	2,61	2,74
11/09/2015	Arcelor	5124P033	70	0,152	2,81	2,89
20/10/2015	Arcelor	5254P518	69	0,152	2,62	2,64
30/10/2015	Arcelor	5276K002	70	0,151	2,74	2,71
24/11/2015	Arcelor	5285P024	69	0,151	2,41	2,32
24/11/2015	Arcelor	5194K018	70	0,150	2,51	2,61

Dos dados analisados, conclui-se que a dureza do material recepcionado tem um valor médio de  $69,8 \pm 1,1$  HR. A espessura é um parâmetro constante, sendo que a sua variação é inferior a 10% relativamente ao valor médio. Quanto ao revestimento de estanho, pode concluir-se que ambas as superfícies possuem muitas vezes uma espessura inferior à de referência, assim como a superfície superior tem uma variação da espessura de camada mais elevada. A Tabela 12 resume a informação acima descrita.

Tabela 12 – Valores médios e desvio da dureza, espessura da folha flandres e camada de estanho

	Dureza	Espessura	Estanho superfície superior	Estanho superfície inferior
<b>Valor referência</b>	<b>&gt;65 HR</b>	<b>0,150 mm</b>	<b>2,800 g/m<sup>2</sup></b>	<b>2,800 g/m<sup>2</sup></b>
<b>Média</b>	69,846	0,151	2,548	2,639
<b>Desvio</b>	±1,099	±0,001	±0,206	±0,151

### 3.2.3.1 Caracterização mecânica - Ensaio de tracção

Para a caracterização mecânica da matéria-prima utilizada na empresa, foram recolhidas amostras de FF de vários fornecedores e lotes diferentes. A tabela seguinte resume a informação sobre as várias amostras recolhidas.

Tabela 13 – Identificação das amostras de FF

Amostra	Código	Ordem	Fornecedor	Nº Coil	Têmpera	Estanho	Acabamento
F1	51-32852	5000021974	ARCELOR	5292K050	520 / CA	2,8/2,8	P
F2	51-32852	5000021974	ARCELOR	5287P020	520 / CA	2,8/2,8	P
F3	51-32852	5000022435	BAOSHAN (CHINA)	5993958701	TH 520	2,8/2,8	STONE
F4	51-32852	5000022435	BAOSHAN (CHINA)	5993958601	TH 520	2,8/2,8	STONE
F5	51-32852	5000022435	ZYPOSCO	CEX1A2741A	TH 520	2,8/2,8	STONE
F6	51-32852	5000022858	ZYPOSCO	CEX1A2743A	TH 520	2,8/2,8	STONE

Um material que possua as mesmas propriedades em qualquer direcção, é denominado de isotrópico. No entanto, a maior parte dos materiais apresenta diferentes propriedades na direcção da laminagem, direcção perpendicular ao da laminagem e a 45°. Esta variação é conhecida como anisotropia planar. De forma a verificar a existência desta característica, foram testados quinze provetes retirados em cada uma destas direcções (laminagem, perpendicular à laminagem e a 45° da laminagem). Recorrendo à Norma NP EN 10002-1 2006 [50], a geometria dos provetes é a do tipo 2, com dimensão de 140 x 20 x 0,15 [mm] e com uma velocidade de ensaio de 2 mm/min. A Tabela 14 resume os resultados obtidos nos ensaios de tracção.

Pela análise dos resultados é possível verificar que os provetes apresentam uma tensão de cedência superior na direcção oposta a laminagem e, de acordo com o valor de referência da Norma EN 10202:2001 [3]. Nas restantes direcções a tensão de cedência apresentada é menor que o limite inferior definido pela Norma EN 10202:2001. O mesmo comportamento se verifica na tensão máxima e ruptura, obtidas durante os testes.

Durante os ensaios de tração foi observado um fenómeno de estricção localizada – Bandas de Lüders. Caracterizam-se por serem bandas localizadas de deformação plástica, que podem ocorrer em aços carbono.

Os materiais que apresentam um patamar de cedência no início da deformação plástica, quando sujeitos a esforços de tracção, podem apresentar na sua superfície bandas de deslizamento ou de Lüders, que provocam na superfície uma rugosidade anormal durante o processo de embutidura.

Tabela 14 – Resumo dos valores obtidos no ensaio de tracção a quinze provetes de cada fornecedor (L: sentido laminagem; OL: sentido transversal a laminagem; a 45° do sentido de laminagem)

		Tensão cedência (Rp) [N/mm <sup>2</sup> ]	Tensão Máxima (Rm) [N/mm <sup>2</sup> ]	Tensãp Ruptura [N/mm <sup>2</sup> ]	Deformação	
Valor Norma [3]		520 ± 50	540 ± 50	-	-	
Valor Fornecedor		546	547	-	-	
Arcelor (F1 – F2)	Valores medidos (30 amostras)	L	502 ± 19	493 ± 23	447 ± 23	0,0212 ± 0,0043
	OL	527 ± 16	521 ± 29	458 ± 31	0,0272 ± 0,0094	
	45°L	489 ± 18	494 ± 19	424 ± 21	0,0290 ± 0,0075	
Valor Fornecedor		-	-	-	-	
Baoshan (F3 – F4)	Valores medidos (30 amostras)	L	455 ± 22	484 ± 10	453 ± 10	0,02649 ± 0,0038
	OL	476 ± 24	524 ± 25	484 ± 28	0,0190 ± 0,0039	
	45°L	461 ± 18	504 ± 7	429 ± 62	0,0228 ± 0,0025	
Valor Fornecedor		522	522	-	-	
Zyposco (F5 – F6)	Valores medidos (30 amostras)	L	462 ± 20	484 ± 9	443 ± 15	0,0289 ± 0,0097
	OL	501 ± 19	530 ± 8	456 ± 18	0,0293 ± 0,0080	
	45°L	486 ± 10	505 ± 4	436 ± 23	0,0303 ± 0,0058	

As Bandas de Lüders (também conhecidas por linhas de Hartmann ou linhas de Piobert), são bandas localizadas de deformação plástica que ocorrem em materiais metálicos, cuja nucleação e propagação produz um escoamento descontínuo. Esta deformação localizada ocorre geralmente a 45 graus relativamente ao eixo de tensão primário e pode formar ondulações ou bandas de Lüders, quando a deformação atinge a superfície do metal. Estas deformações indicam que esta região do metal foi sujeita a uma tensão superior, comparativamente a regiões contíguas [51]. Várias investigações sobre a teoria das deslocações e parâmetros microestruturais (tamanho de grão, concentração precipitado, solutos, átomos de impurezas, etc.) mostraram ter

influência na ocorrência e propagação das Bandas de Lüders (Figura 29) [52-54]. Vários estudos têm abordado também os parâmetros macroestruturais e o teste de variáveis (variáveis térmicas, taxa de deformação, geometria, etc.) [55-57].

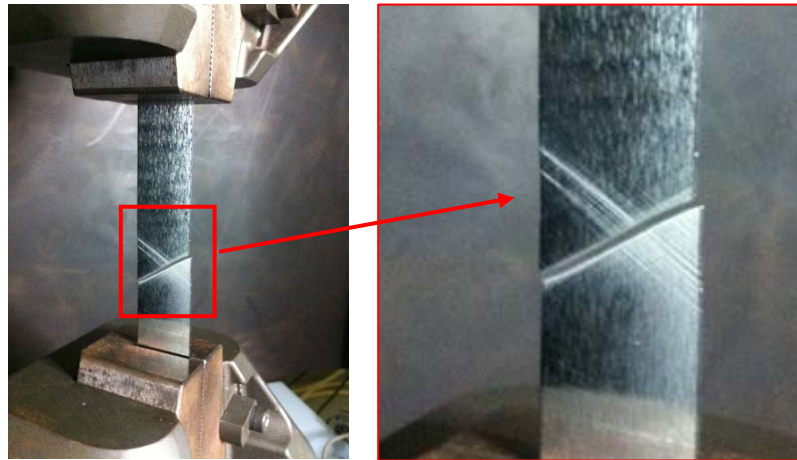


Figura 29 – Bandas de Lüders formadas num provete tracionado

### 3.2.3.2 Caracterização metalúrgica - Análise SEM

A FF foi sujeita a caracterização metalúrgica, tendo sido realizada a avaliação da espessura da FF dos três fornecedores (Arcelor, Baoshan e Zyposco) e a análise da composição química de cada uma das amostras.

As amostras da Baoshan e Zyposco possuem uma espessura aproximada à esperada (0,15 mm), a FF da Arcelor possui uma espessura um pouco maior, cerca de 40%. Os resultados podem ser observados na Figura 30 e Figura 31. Foi também observada a distribuição da camada de estanho na superfície do substrato da FF. Concluí-se que a camada é pouco uniforme ao longo da superfície do aço, possivelmente relacionado com a dificuldade de preparação das amostras.

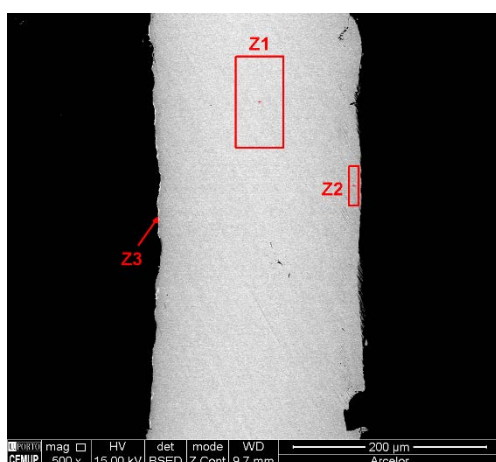


Figura 30 - Secção transversal da observação da FF

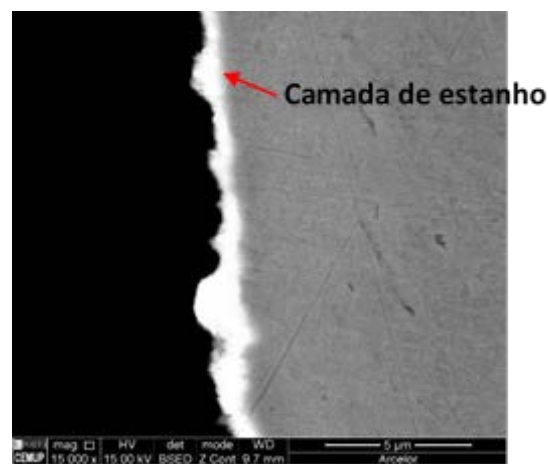


Figura 31 - Pormenor da secção transversal da superfície da FF – espessura do estanho

Na Figura 32 pode-se observar os espectros da análise EDS a três zonas distintas da FF. Verifica-se que a composição na superfície não é muito dissimilar do núcleo da FF e, como se pode constatar pelos espectros das zonas Z1 e Z2, pode-se concluir que a sua composição é relativamente homogênea.

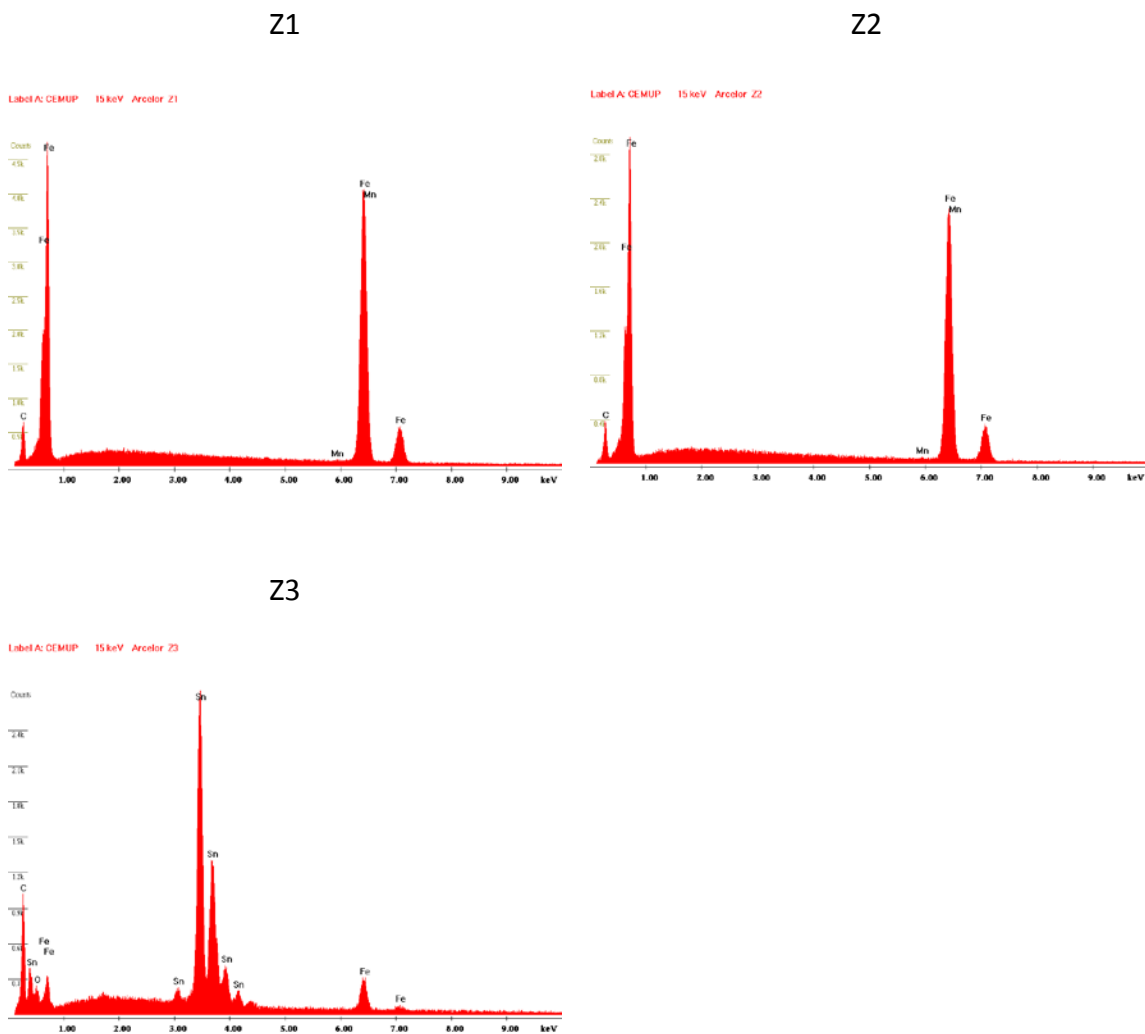


Figura 32 – Espectros das zonas Z1, Z2 e Z3 da Figura 31, relativa à FF da Arcelor, obtidos por EDS

Nas Figura 33, 34 e 35, poderão analisar-se as micrografias relativas à topografia e espessura das diferentes FF usadas neste estudo.

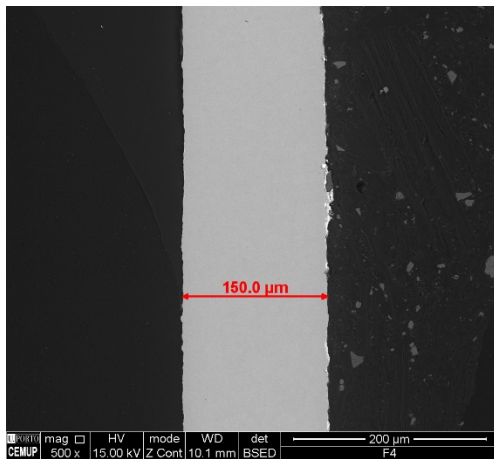


Figura 33 – Topografia e espessura da FF Baoshan

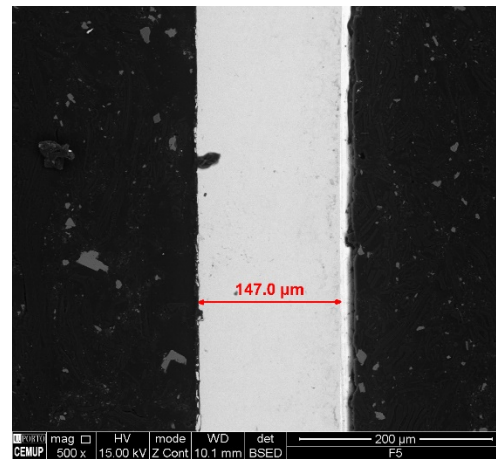


Figura 34 - Topografia e espessura da FF Zyposco

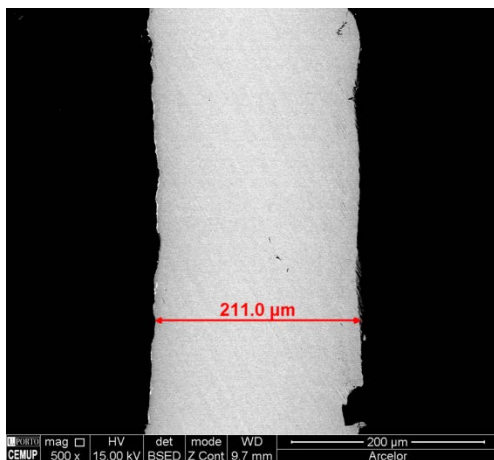


Figura 35 - Topografia e espessura da FF Arcelor

### 3.2.4 Revestimento

O objetivo do revestimento será prolongar a vida útil das ferramentas e, para tal, deverá existir um equilíbrio entre o desgaste que a ferramenta sofre e o coeficiente de atrito a que está sujeita, que deverá ser o mais baixo possível.

Todos os revestimentos utilizados neste estudo foram realizados pela empresa TEandM, parceiro e fornecedor de longa data da Colep. A TEandM tem as suas instalações no Parque industrial de Taveiro em Coimbra. A sua principal actividade está concentrada a produção de revestimentos técnicos de componentes para aplicações industriais, utilizando tecnologias de projecção térmica de alta velocidade (Plasma, HVOF, EAWS), revestimentos físicos em estado de vapor (PVD, PA-CVD) e Laser Cladding.

#### 3.2.4.1 Resultados preliminares (antes da realização deste trabalho)

Com a parceria da TEandM, foram sendo testados alguns revestimentos em produção, que fruto da experiência e aplicações similares, se pensavam ser os mais apropriados

para a aplicação em processo de estampagem de FF, sem recurso a lubrificação. Seguidamente, serão apresentados os revestimentos testados em produção e respectivos resultados.

### **TiAlN – Nitreto Titânio Alumínio**

O revestimento TiAlN é um revestimento intermetálico. Este revestimento possui elevada resistência ao desgaste, possuindo uma elevada dureza e baixo coeficiente de atrito. Foram estes os principais argumentos para que fosse investido tempo no seu estudo e caracterização, com vista à aplicação em processos de estampagem de FF.

Tabela 15 - Propriedades típicas do revestimento de TiAlN (Substrato de aço rápido AISI M2) [58]

<b>Descrição Propriedade</b>	
Espessura ( $\mu\text{m}$ )	2 a 5
Microdureza (HV 0,05)	1500 a 2000
Ultra Microdureza (GPa)	19 a 20
Coeficiente de Atrito (DIN 100 Cr6)	0,2
Carga Crítica de Adesão (N)	20 a 25
Módulo de Elasticidade (GPa)	231
Temperatura Máxima de Serviço ( $^{\circ}\text{C}$ )	900
Cor	Cinzento metálico

Após ensaio em produção, verificou-se que existiu transferência da litografia para o revestimento, ou seja, a superfície da ferramenta ficou colorida com o mesmo tom da cor impressa na FF.

### **DLC – *Diamond Like Carbon***

O revestimento Diextraultra é um revestimento cuja descrição é utilizada para o revestimento DLC. É um revestimento caracterizado pela elevada resistência ao desgaste adesivo, formando uma película de grafite sob solicitação mecânica com movimento relativo a um contracorpo, que se comporta como lubrificante sólido de alta resistência ao desgaste.

A ferramenta revestida foi colocada em serviço, observando-se que após a estampagem de vinte tampos, estes começaram a apresentar defeitos funcionais devido a acumulação de estanho na sua superfície do centro, conforme mostrado na Figura 36. Comparando visualmente com os resultados obtidos do ensaio do revestimento TiAlN com o DLC, verifica-se que existe uma maior transferência de estanho para a sua superfície.

Tabela 16 - Propriedades típicas do DLC (Substrato de aço rápido AISI M2) [46]

Descrição Propriedade	
Espessura ( $\mu\text{m}$ )	2 a 5
Microdureza (HV 0,05)	1470 a 3000
Ultra Microdureza (GPa)	19 a 30
Coeficiente de Atrito (DIN 100 Cr6)	0,3 a 0,4
Carga Crítica de Adesão (N)	23 a 33
Módulo de Elasticidade (GPa)	290 a 320
Temperatura Máxima de Serviço ( $^{\circ}\text{C}$ )	650
Cor	Preto



Figura 36 -Aspecto do centro com revestimento DLC no final do ensaio

### 3.3 Descrição dos equipamentos e métodos de análise do revestimento

#### 3.3.1 Técnica de deposição do revestimento – PVD (*Physical Vapours Deposition*)

Para a obtenção dos filmes em estudo foi utilizado um sistema CemeCon® CC800/9ML PVD *Magnetron Sputtering* utilizando a técnica de *Unbalanced Magnetron Sputtering*. Antes da deposição do filme, as amostras foram limpas num banho de desengorduramento por ultra-sons durante 10 minutos, seguido por banho de água desmineralizada, de forma a evitar a contaminação da superfície. Subsequentemente, as amostras foram montadas num suporte da máquina PVD, com uma rotação de 1 rpm durante o processo de revestimento, que se destina a promover uma melhor distribuição molecular e a obtenção de camadas finas homogéneas. Os parâmetros utilizados no processo de deposição são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros de deposição utilizados na pulverização catódica (PVD)

	CrCN	WC	B <sub>4</sub> C	Mo	TiAlN
Tempo de deposição (min)	134	110	500	90	180
Tempo dos gases na câmara	Kr – 120 mln, Ar – 180 mln, N <sub>2</sub> - 100 mln, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> - 70 mln	Kr – 200 mln, Ar – 295 mln	Kr – 200 mln, Ar – 295 mln	Kr – 200 mln, Ar – 295 mln	Kr-120 mln, Ar-180mln, N <sub>2</sub> -120 mln
Pressão (mPa)	500	500	500	500	600
Temperatura (°C)	380	380	380	380	480
Bias (V)	-80	-90	-90	-90	-90
Intensidade de corrente nos alvos (A)	10	10	10	10	10
Velocidade de rotação do suporte (rpm)	1	1	1	1	1

### 3.3.2 Métodos de análise da morfologia e espessura

#### 3.3.2.1 Microscopia Electrónica de Varrimento (MEV/SEM)

A espessura foi avaliada utilizando um microscópio electrónico de varrimento FEI Quanta 400FEG (SEM) equipado com espectroscópio de raios-X EDAX Genesis (EDS). O mesmo equipamento foi utilizado para caracterizar a morfologia superficial e os sulcos de desgaste.

De forma a ser possível a análise da espessura de filme e a sua vista em corte da sua secção, as amostras foram cortadas utilizando uma serra de disco STRUERS MINITOM, seguida de preparação metalográfica. Seguidamente, as amostras foram montadas em resina termoendurecível, utilizando o equipamento STRUERS PREDOPRESS, resultando um cilindro adequado para ser utilizado nas operações de lixagem e polimento. No processo de retificação foi utilizado um conjunto adequado de lixas abrasivas (sequência: 220, 500, 800 e 1200 partículas por polegada quadrada), tendo o cuidado de utilizar várias direcções de movimento, de forma a eliminar os sulcos anteriores, no processo seguinte. Depois disto, as superfícies foram polidas utilizando uma solução de grão de diamante de 3 µm e 1 µm, por esta ordem, de modo a obter a vista de secção transversal do revestimento o mais exacta possível.

### 3.3.2.2 Microscopia de força atômica - AFM

Após a preparação das amostras, a rugosidade superficial foi avaliada com recurso a um microscópio de força atômica (AFM) VEECO multimode (7 nm de raio da ponta), considerando duas áreas de análise distintas: 10 x 10  $\mu\text{m}^2$  e 50 x 50  $\mu\text{m}^2$ .

### 3.3.2.3 Rugosidade

A rugosidade foi também avaliada com recurso a um rugosímetro MAHR PERTHOMETER M2 (Figura 37), utilizando o mesmo procedimento normalmente usado em ambiente industrial. Considerando a rugosidade expectável, foi selecionado uma distância de *cutoff* de 0,8 mm, respeitando a norma DIN EN ISO 4288 / ASME B461 [60] e as medições foram realizadas usando sete segmentos de 0,8 mm, ignorando o primeiro e o último devido a efeitos de inércia. Os parâmetros selecionados para avaliação da rugosidade foram a rugosidade média aritmética ( $R_a$ ), rugosidade máxima ( $R_{\text{max}}$ ) e o *R-profile*.

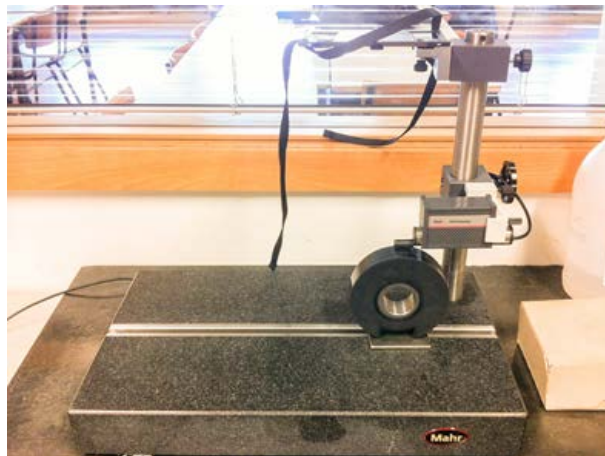


Figura 37 - Rugosímetro MAHR PERTHOMETER M2

### 3.3.3 Microdureza

Foi utilizado um durómetro Fisherscope H100, provido de um indentador *Vickers*, para avaliar a microdureza do revestimento. A carga normal selecionada foi de 50 mN, que foi mantida durante 30 segundos, evitando assim o fenómeno de fluência. Este equipamento produz curvas de 'carga-deslocamento', permitindo a análise da dureza (H) e o módulo reduzido de Young ( $E_r$ ). Este teste foi realizado oito vezes em diferentes áreas de cada amostra, para obter um valor médio com a precisão necessária. Estes testes foram realizados de acordo com a norma ISO 14577-1:2015 [61]. Os resultados são apresentados na secção 3.5.1.5, tendo sido processados e analisados utilizando o *software* Hardness 6.00.

### 3.3.4 Adesão (Identação e *scratch*)

A adesão entre os revestimentos e o substrato foi verificada e medida por duas técnicas diferentes: testes de *scratch* e identação Rockwell. Os testes de *scratch* foram realizados utilizando o equipamento CSM REVETEST não provido de emissão acústica, de acordo com a norma BS EN ISO 20502: 2016 [62]. O intervalo de carga selecionado foi de 0 a 100 N, a uma taxa de  $10 \text{ N}\cdot\text{min}^{-1}$  e, uma velocidade de deslocamento de identação de  $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , o que produz um ‘risco’ progressivo devido à ação do identador de diamante Rockwell. Este procedimento foi repetido três vezes para cada amostra, de modo a aumentar a precisão dos resultados. As identações Rockwell foram realizadas num durómetro EMCO M4U Universal com uma carga de 1470 N (150 kgf) e os modos de falha foram avaliados de acordo com o especificado na norma VDI 3198:1991 [53]. As amostras foram observadas utilizando microscopia ótica (microscópio ótico OLYMPUS BX51) e os resultados foram comparados com as ilustrações e modos de falha apresentados na norma referida acima, permitindo a classificação do padrão de falha obtido.

### 3.3.5 Caracterização do comportamento ao desgaste

O comportamento ao desgaste foi analisado usando uma configuração de teste *block-on-ring* (bloco em pista) num tribómetro de Blouet (Figura 38). As pistas revestidas foram montadas num eixo dotado de velocidade de rotação controlada eletricamente através de um *driver* inversor de frequência. A secção superior do tribómetro tem liberdade de movimento na direção ascendente e descendente, permitindo a montagem do bloco no suporte do equipamento e posterior ajuste à superfície da pista. A pista revestida tem por objetivo simular a superfície da ferramenta revestida. Por outro lado, a FF foi ligada com Loctite 454 adesivo estrutural, à superfície do bloco, de forma a simular a ação da FF durante o processo de estampagem, isto é, atuando como contra-corpo da superfície revestida. Os testes foram realizados em regime de contacto seco com 70 N de carga normal e velocidade linear de 0,38 m/s. No que diz respeito aos testes de desgaste em laboratório, estava conectada ao braço do tribómetro uma célula de carga, para avaliar a força tangencial induzida pelo contacto entre a superfície da pista revestida e a FF ligada a superfície do bloco. O sinal emitido pela célula de carga é enviado para um dispositivo eletrónico que amplifica o sinal recebido a partir da célula de carga, e o envia para uma placa de aquisição de dados (National Instruments®). Esta placa envia os dados para um computador, o qual possui uma aplicação informática realizada na FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) baseada em LabView 4.0, a qual permite registar e colocar os dados tratados em forma de gráfico MS Excel®.

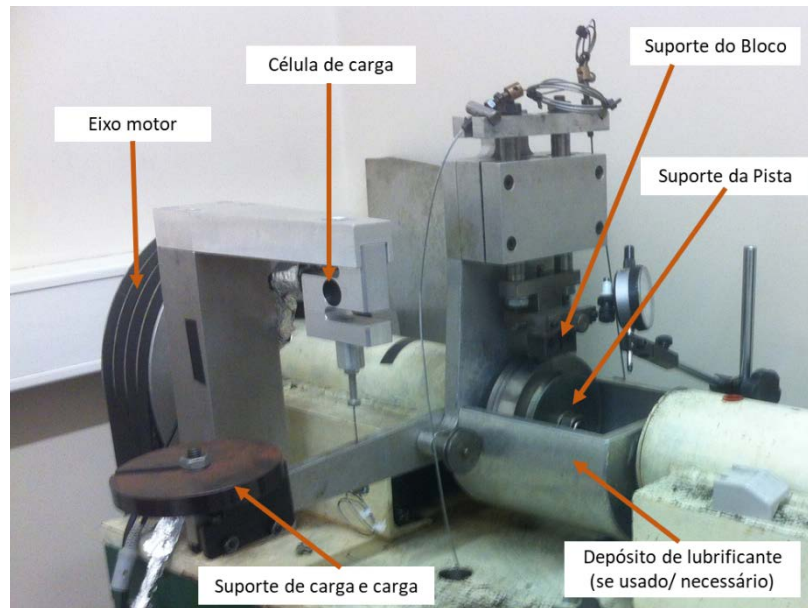


Figura 38 – Vista da configuração do tribómetro Blouet

A caracterização do desgaste foi também realizada num tribómetro de Plint TE-66<sup>TM</sup>, apresentado na Figura 39, o qual se destina a ensaios de micro-abrasão por esfera rotativa.

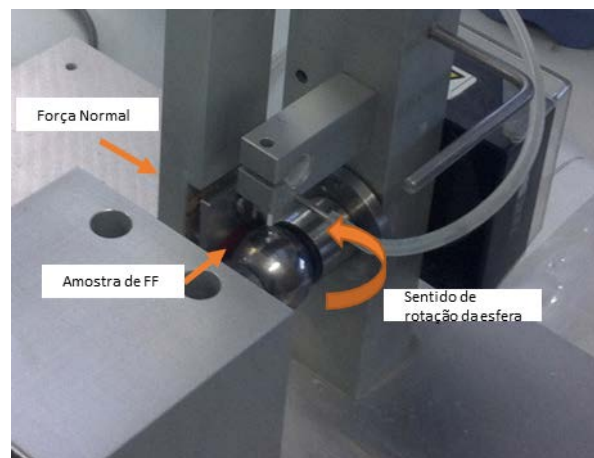


Figura 39 – Promenor da configuração do tribómetro de micro-abrasão por esfera rotativa PLINT TE-66

Este tipo de teste é adequado para materiais revestidos porque permite a determinação de resistência ao desgaste do revestimento, mesmo que o revestimento seja perfurado durante os testes de desgaste. A velocidade de rotação usada foi de 80 rpm (0,105 m/s). A força normal selecionada (0,5 N) teve de ser baixa, de forma a garantir que não existisse perfuração da FF. A duração do teste foi de 5000 ciclos, desenvolvido sem recurso a abrasivos. Toda a configuração definida (Figura 43) teve o propósito de simular o mais fidedignamente possível o processo industrial, e com isso maximizar a fiabilidade do teste na previsão do comportamento em funcionamento.

### 3.4 Desenvolvimento de novos revestimentos

#### 3.4.1 Caracterização laboratorial dos revestimentos

##### 3.4.1.1 Preparação dos provetes

O comportamento tribológico dos revestimentos é fundamental para determinar a facilidade com que o processo funciona, sem que haja transferência de estanho para a superfície da ferramenta. Com o objectivo de caracterizar este comportamento, foram realizados dois ensaios tribológicos, como referido anteriormente. O primeiro, de desgaste com um tribómetro *Plint* de micro-abrasão por esfera rotativa, utilizou esferas com 25 mm de diâmetro revestidas com os vários revestimentos em estudo, contra FF litografada. Esta configuração foi escolhida pela conhecida natureza dos materiais a ensaiar, daí o revestimento das esferas com os filmes em teste, e assim a possibilidade desenvolver o estudo com os provetes de FF na superfície plana da contra-face. Foi utilizada uma carga de 0,5 N e, como referido anteriormente, no contacto não foi utilizado qualquer abrasivo, para que o ensaio simulasse o mais possível o tipo de contacto que existe em ambiente industrial. A FF foi colada em bases quadrangulares com 20 x 20 x 5 [mm] (Figura 40) com adesivo Loctite 454.

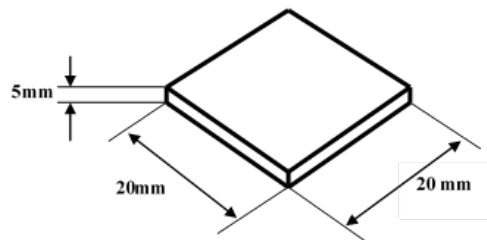


Figura 40 – Geometria das bases para a FF – Ensaio desgaste por micro-abrasão

Para o teste de atrito, foi utilizado um tribómetro de Blouet que possibilitou a obtenção de um contacto uniforme entre a pista e o bloco. As pistas foram maquinadas no aço 1.2379, tendo acabamento superficial e tratamento térmico semelhante ao realizado nas ferramentas de estampagem utilizadas na produção, sendo pretendido que a pista simulasse a superfície da ferramenta e o bloco representasse a FF. Tal como no ensaio anterior, pretendia-se simular o mais possível as condições de produção e, por esta razão, o ensaio foi desenvolvido em regime seco. Após a maquinagem, as pistas foram retificadas e polidas mecanicamente com uma suspensão de partículas de diamante com 3  $\mu\text{m}$ , cerca de 15 minutos, a fim de se obter o acabamento de superfície equivalente à ferramenta utilizada em produção. Após tratamento, as pistas foram revestidas com os diferentes revestimentos em estudo. Os blocos foram produzidos com um raio interno de 60,2 mm, de modo a acomodar devidamente a FF e manter o raio no valor especificado. Não foram polidos, uma vez que apenas serviram de base à FF que foi posteriormente colada. Assim, as amostras de FF com dimensões de 10 x 30 [mm] foram coladas com Loctite 454 na superfície do

bloco, sendo a rugosidade do bloco útil para facilitar a adesão e melhorar a ligação. A Figura 41 apresenta a geometria das pistas e blocos.

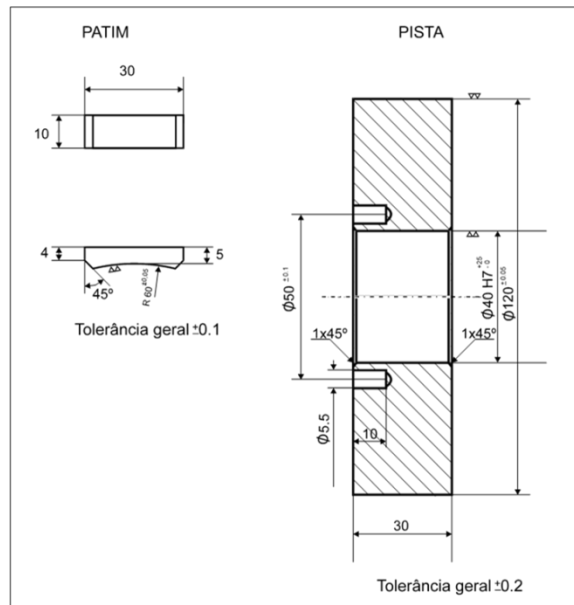


Figura 41 – Desenho do patim e pista utilizados nos ensaios de atrito e desgaste – tribómetro Blouet

### 3.4.1.2 Morfologia e espessura de filme

Após a deposição PVD dos filmes, a superfície foi caracterizada por SEM. A Figura 42 apresenta a morfologia dos filmes dos revestimentos, sendo possível observar que, tanto o  $B_4C$  como o WC possuem uma estrutura essencialmente globular, enquanto o CrCN e o Mo apresentam predominantemente uma estrutura colunar, menos rugosa que os anteriores. O filme de TiAlN, por outro lado, apresenta uma superfície mais suave, sendo geralmente mais adequada para fins tribológicos. As estruturas globulares tendem a soltar os aglomerados durante o movimento de deslizamento, os quais actuam como partículas abrasivas, conseqüentemente, promovendo o desgaste correspondente.

A observação das imagens SEM da secção transversal dos revestimentos, permite concluir que os filmes CrCN,  $B_4C$  e Mo são constituídos por uma película monocamada fina e uniforme, com uma espessura de  $\sim 5 \mu m$ . Os revestimentos TiAlN e WC têm uma espessura menor, a qual variou entre  $\sim 2 \mu m$  e  $\sim 3 \mu m$ , como pode ser visto na Figura 43. Os espectros EDS recolhidos na secção transversal, permitiram concluir que a composição está de acordo com o esperado.

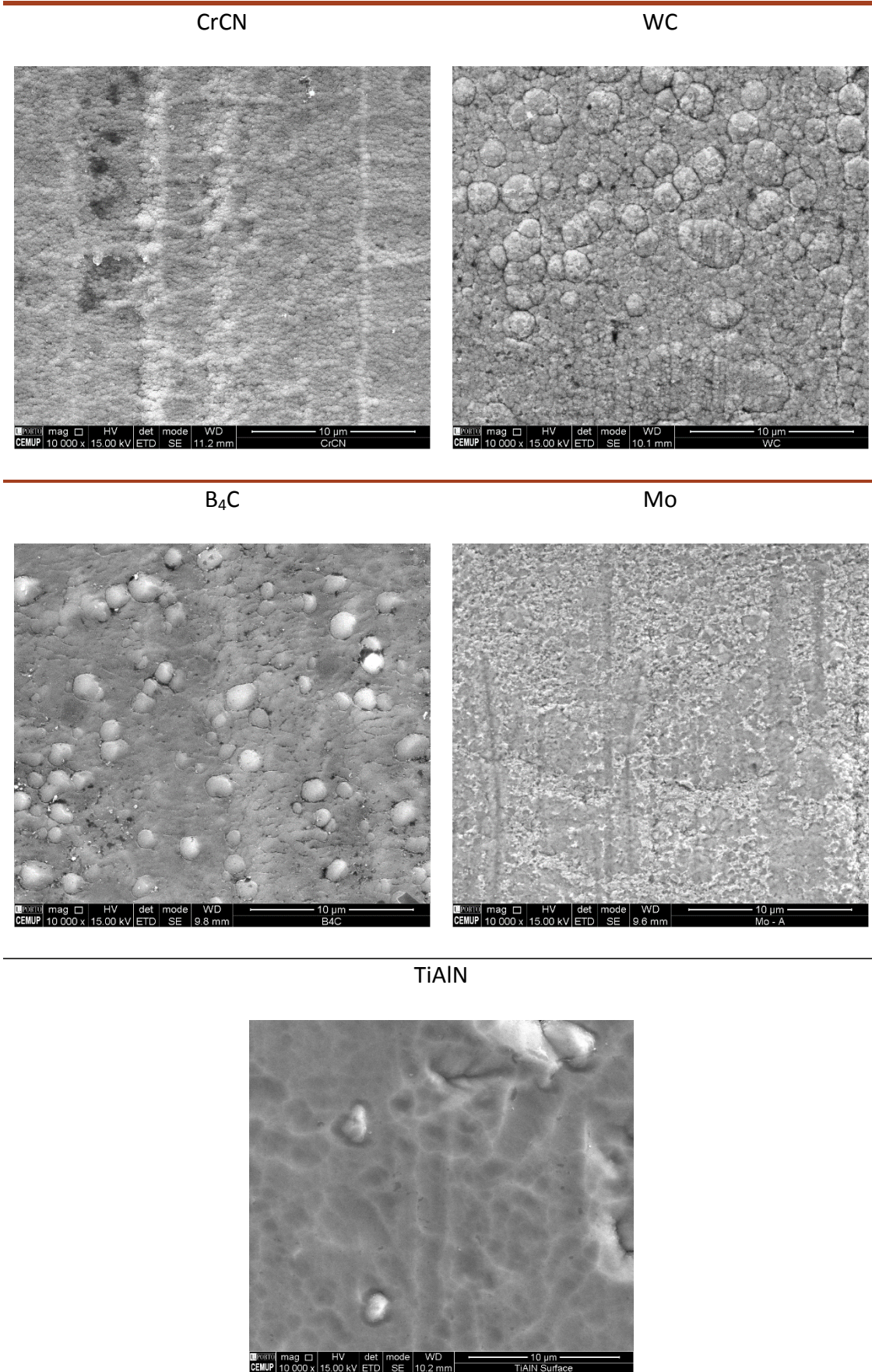


Figura 42 – Imagem SEM da morfologia da superfície dos revestimentos

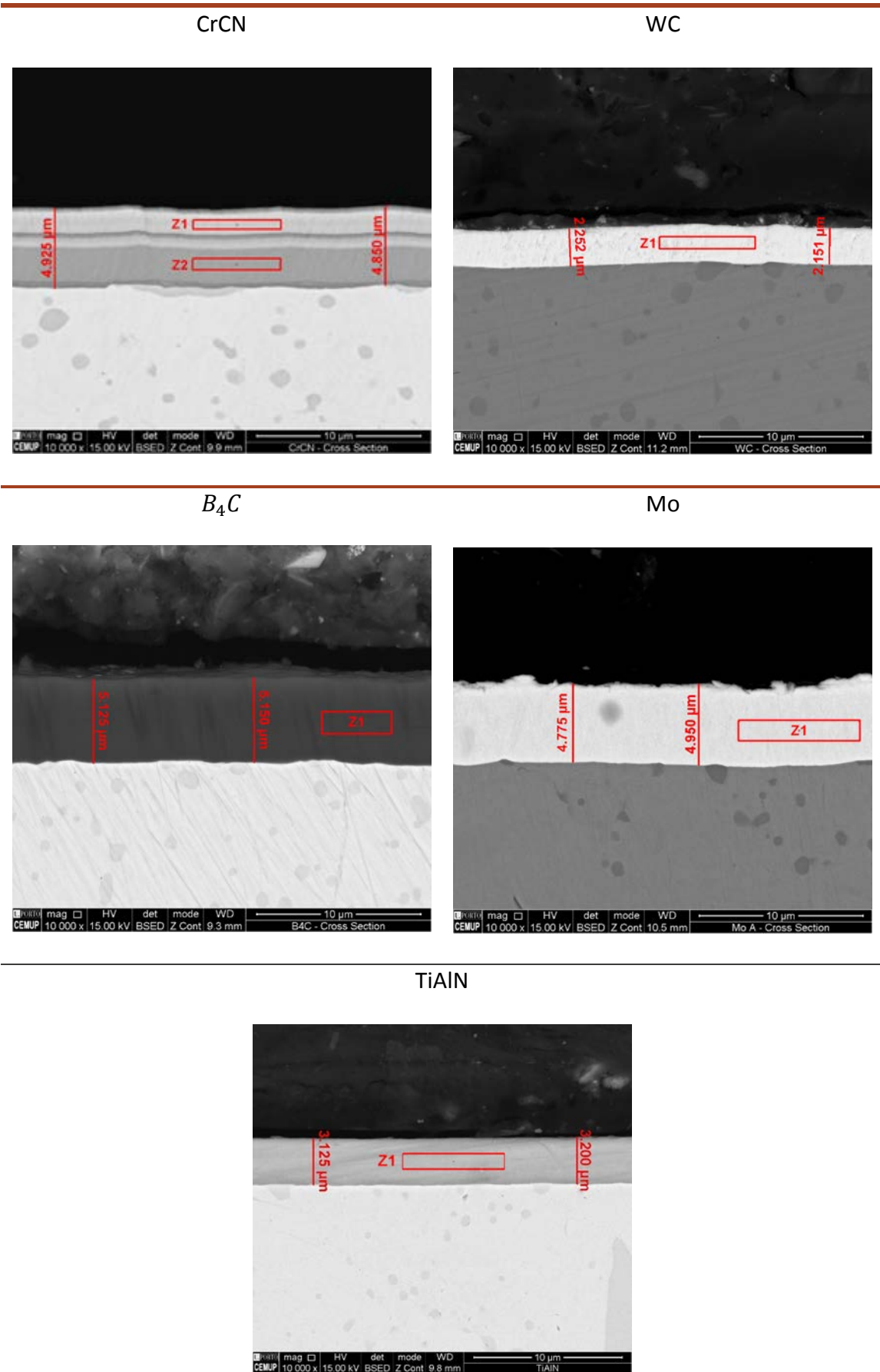
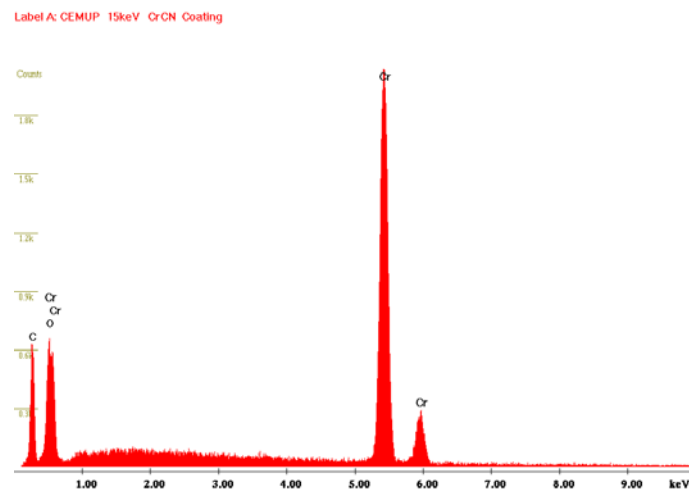


Figura 43 – Espessura dos revestimentos observados de topo por SEM

A análise EDS completou a informação relativa à composição dos revestimentos. Na leitura do espectro ao revestimento  $B_4C$  (Figura 44) é possível verificar que existem elementos como o árgon e o krípton. Estes dois gases são utilizados na câmara durante a deposição do filme. Possivelmente, a origem dos vazios observados durante a análise da espessura do filme deve-se ao aprisionamento destes gases na sua estrutura. Por outro lado, no que diz respeito ao filme CrCN, é possível distinguir duas camadas distintas (Figura 46). Os espectros EDS das duas áreas revelam que a camada inferior apresenta uma quantidade superior de azoto (N) comparativamente à camada superior. Este fenómeno foi provocado pela variação do fluxo de gás na câmara durante o processo de deposição. Era esperado que o estanho apresentasse um comportamento de maior ligação ao revestimento devido à configuração química do azoto e à possibilidade de existir partilha de electrões entre os dois elementos (estanho e azoto). Por este motivo, a quantidade de azoto foi diminuída durante o processo de deposição. É de salientar que apesar de se tratar de um revestimento multicamada, não existem consequências negativas na ligação de ambas, uma vez que há apenas uma variação na quantidade de azoto. Além disso, também se verifica que todos os revestimentos apresentam óxidos na sua superfície, o que possivelmente se fica a dever ao método utilizado para o corte das amostras (*EDM – Electrical Discharge Machining*).

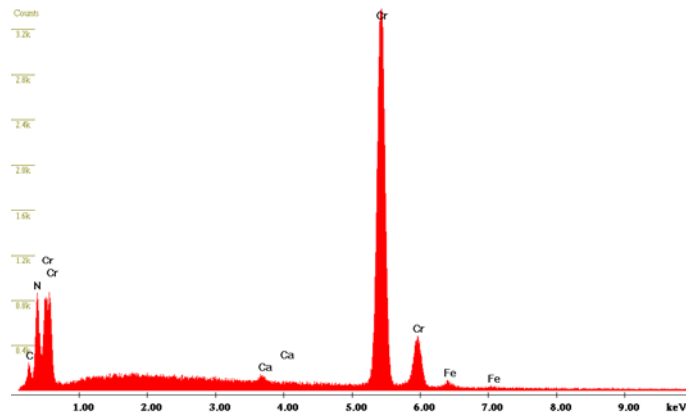
---

### CrCN (Z1)



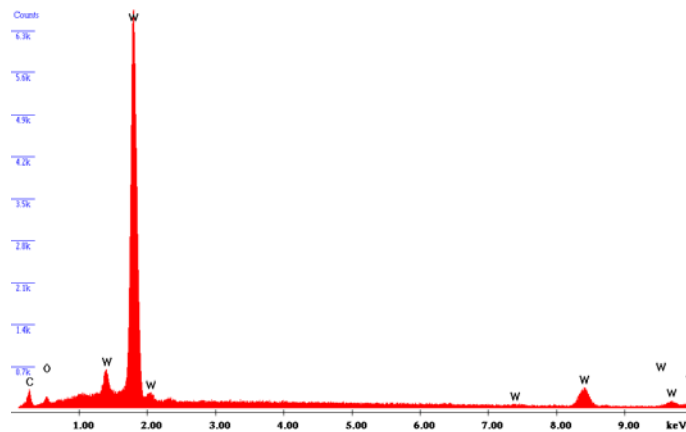
### CrCN (Z2)

Label A: CEMUP 15keV CrCN Cross Section Z2



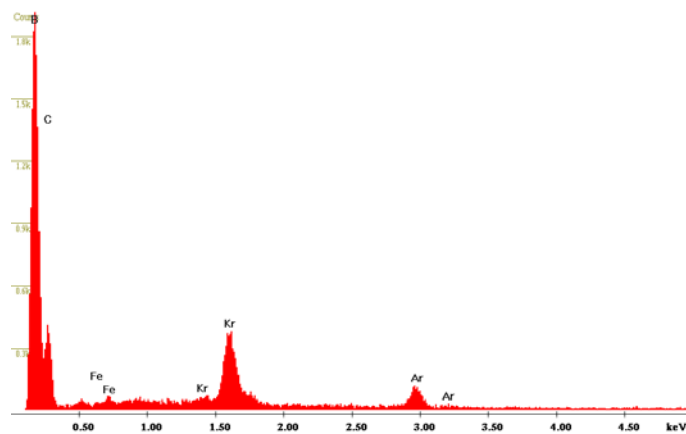
### WC

Label A: CEMUP 15keV WC Coating

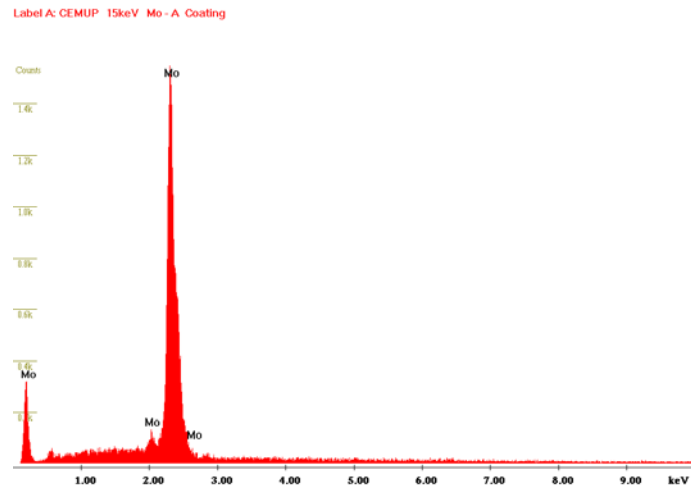


### B<sub>4</sub>C

Label A: CEMUP 15keV B4C Coating



O



TiAlN

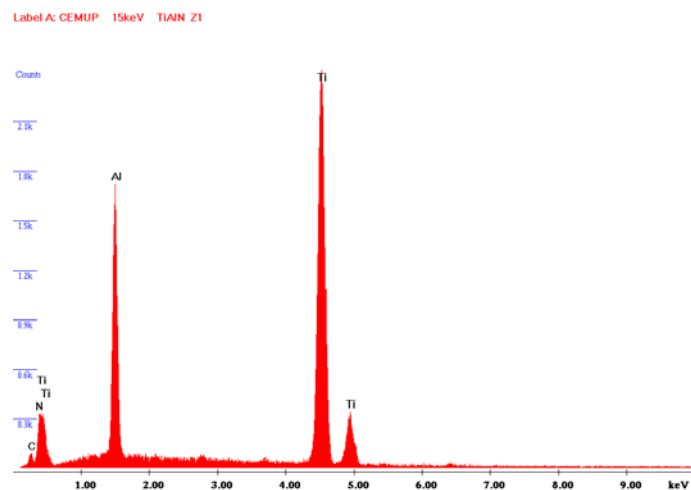
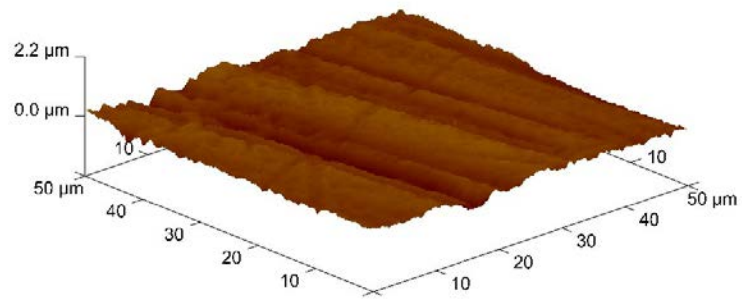


Figura 44 – Espectros da composição dos filmes de revestimento obtidos por EDS

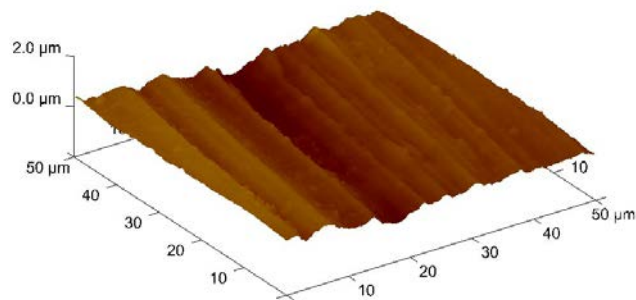
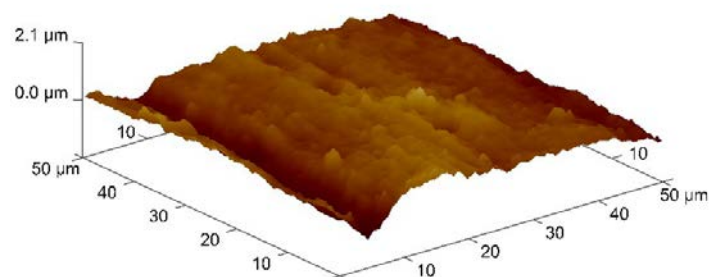
### 3.4.1.3 Análise da rugosidade

A rugosidade da superfície foi avaliada com recurso a duas técnicas diferentes: AFM e Perfilometria. Os sulcos resultantes do processo prévio de maquinagem na superfície dos vários revestimentos podem ser observados na Figura 45, através de imagens que foram obtidas por microscopia de força atómica (AFM).

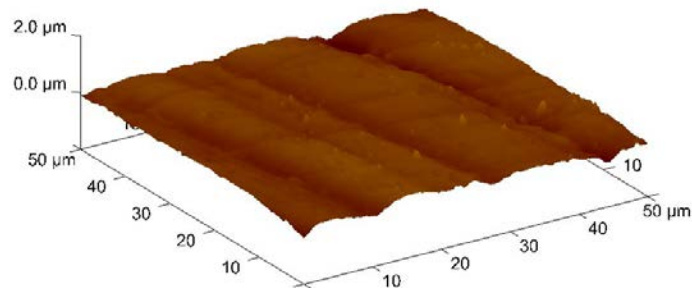
CrCN



WC

 $B_4C$ 

## Mo



## TiAlN

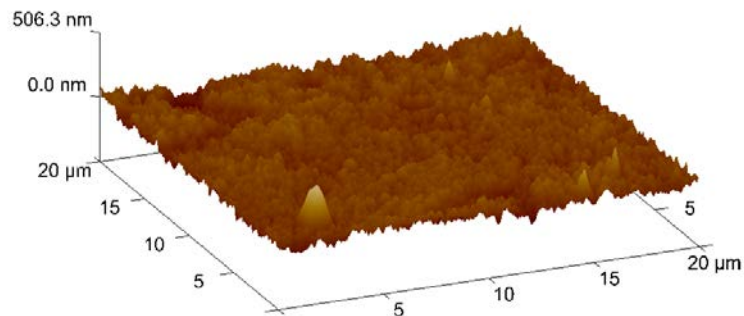


Figura 45 - Análise AFM 3D da morfologia dos revestimentos

Dos resultados obtidos na análise topográfica realizada por AFM, apresentados na Tabela 18, e considerando os valores de rugosidade da superfície antes do revestimento, verifica-se uma diminuição significativa da rugosidade média aritmética e da rugosidade máxima, denotando que os parâmetros selecionados para o processo de deposição PVD promovem uma suavização da superfície. Assim, é possível concluir que os filmes depositados preenchem os vales deixados pela retificação, modificando a topografia da superfície. Verifica-se que o filme de  $B_4C$  apresenta um maior valor de rugosidade média e máxima em comparação com os restantes filmes, o que indica que a morfologia globular contribui grandemente para este facto. Isto também conduz à conclusão que existe um crescimento preferencial em torno de alguns cristais iniciais, que é realizado por crescimento similar nas áreas circundantes. Os resultados da análise de perfilometria encontram-se no ANEXO 2 – Imagens SEM da superfície dos revestimentos, os quais foram omitidos nesta secção por não serem tão precisos como os referentes à análise AFM.

Tabela 18 – Valores de rugosidade obtidos por AFM

Valores da rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$	$R_q$	$R_{m\acute{a}x}$
Substrato	0,349		3,618
CrCN	0,109	0,141	1,175
WC	0,155	0,199	1,223
$B_4C$	0,203	0,268	2,055
Mo	0,085	0,111	1,107
TiAlN	0,028	0,031	0,039

#### 3.4.1.4 Adesão entre o substrato e o revestimento (*Scratch test e Identação*)

Foi realizado o *scratch-test* de forma a avaliar a adesão entre o revestimento e o substrato. Os sulcos foram observados por microscopia óptica, com o objectivo de detectar falhas coesivas e adesivas, permitindo localizar onde ocorreram. Considerando a taxa de carga e a velocidade de movimento do identador, fez-se o cálculo da carga correspondente a cada mecanismo de falha, e assim a quantificação da carga normal necessária para produzir a falha inicial. Na Tabela 19 é possível verificar os valores da carga crítica  $Lc_1$ , correspondentes à falha coesiva, assim como a carga crítica  $Lc_2$ , correspondentes à falha adesiva.

Tabela 19 – Valores falhas coesivas e adesivas

Revestimento	$Lc_1$ (N)	$Lc_2$ (N)
CrCN	29	55
WC	26	33
$B_4C$	30	40
Mo	Sem falhas coesivas ou adesivas	
TiAlN	38	Não presenta

Os valores obtidos para os revestimentos CrCN e WC estão em linha com outras análises feitas em filmes similares [63-64]. As primeiras falhas coesivas e adesivas do revestimento  $B_4C$  foram registadas a 30 e 40 N, respectivamente. Os resultados foram superiores ao esperado, comparativamente aos valores normalmente obtidos para estes e outros revestimentos ultra-duros. Diferente do  $B_4C$ , o filme de Mo não apresenta falhas coesivas ou adesivas, conforme esperado, devido à baixa dureza deste revestimento relativamente aos restantes. O filme de TiAlN apresenta a primeira falha coesiva aos 38 N, não apresentando destacamento no bordo do *scratch* e, por isso, não apresenta falha adesiva.

## TiAlN

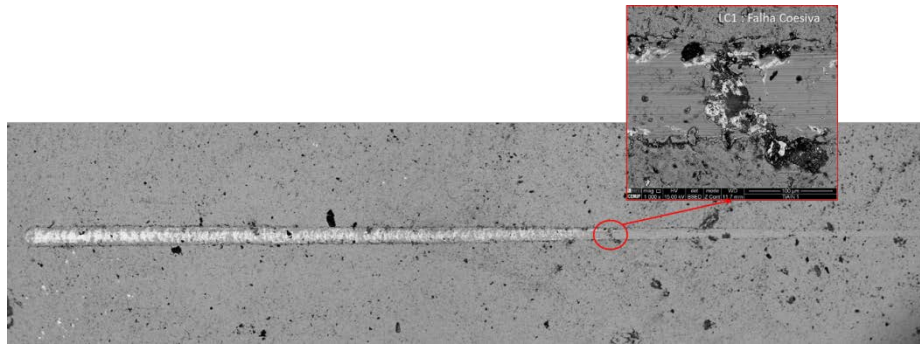
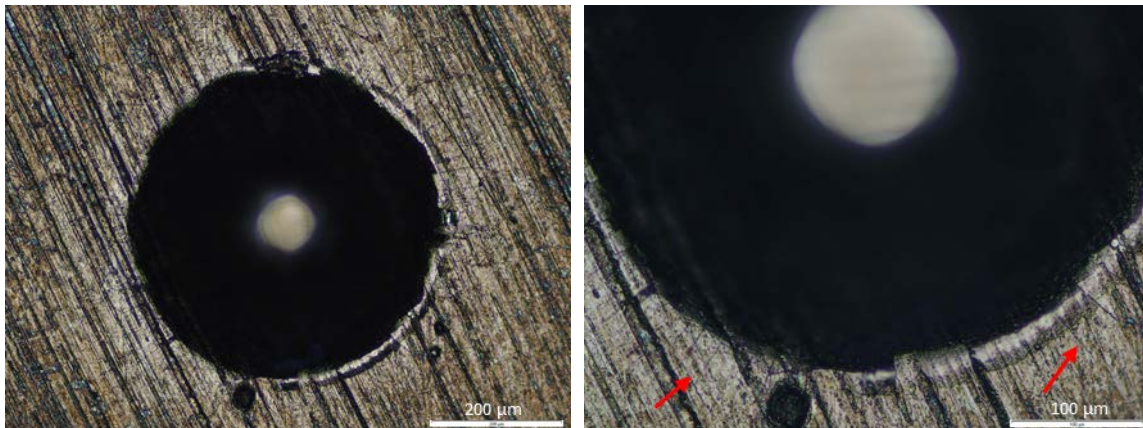


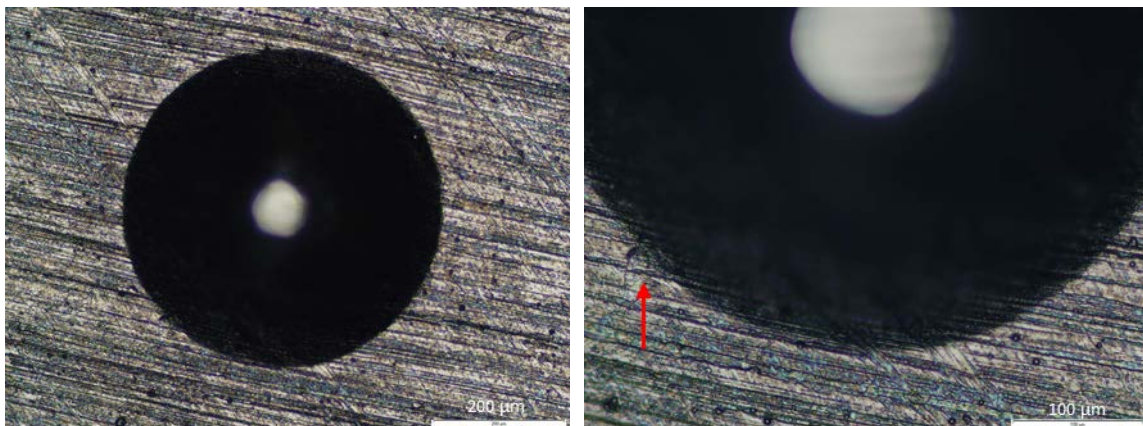
Figura 46 - Microscopia óptica do sulco provocado pelo *scratch test* no revestimento de TiAlN e respectivo detalhe

Assim, para esclarecer este resultado, foram feitas 8 indentações em cada revestimento, em acordo com a norma VDI 3198:1991 [42], permitindo a comparação dessa informação com a anterior. As indentações realizadas com uma carga normal de 150 kgf são apresentadas na Figura 47.

## CrCN



## WC



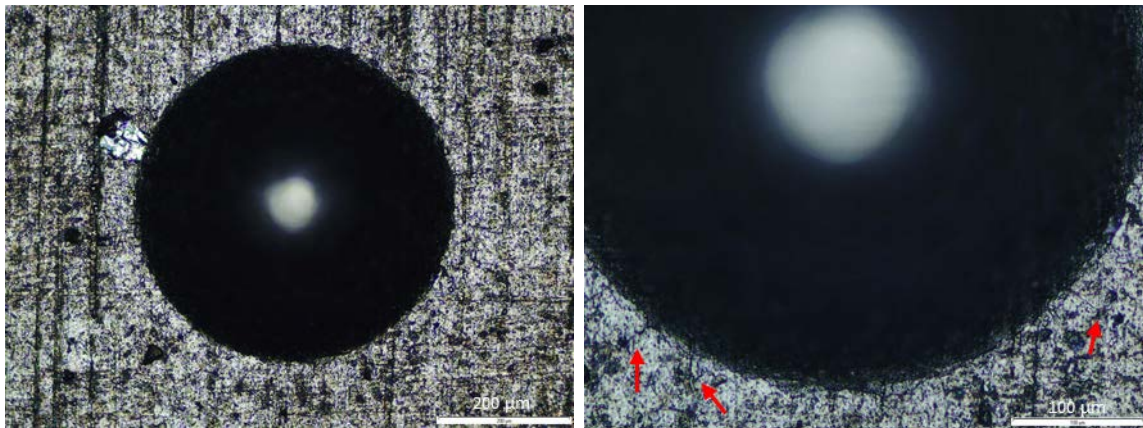
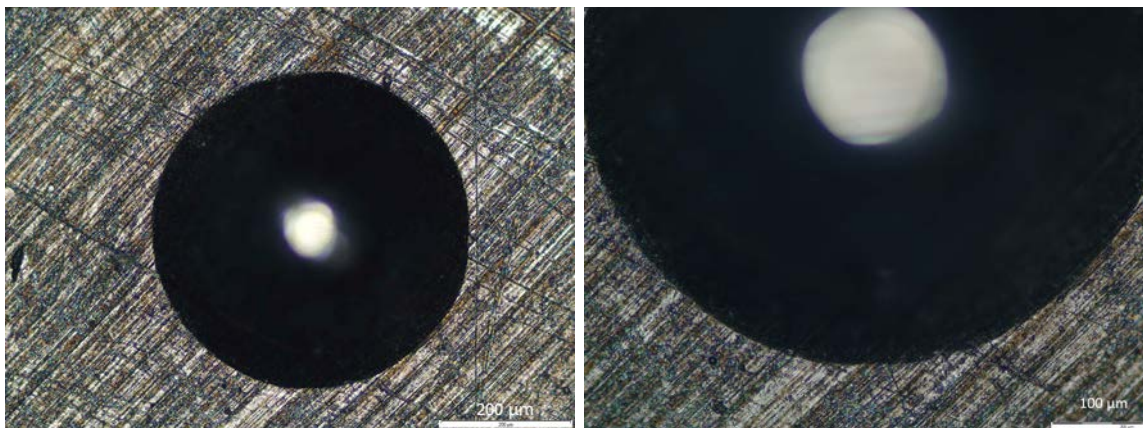
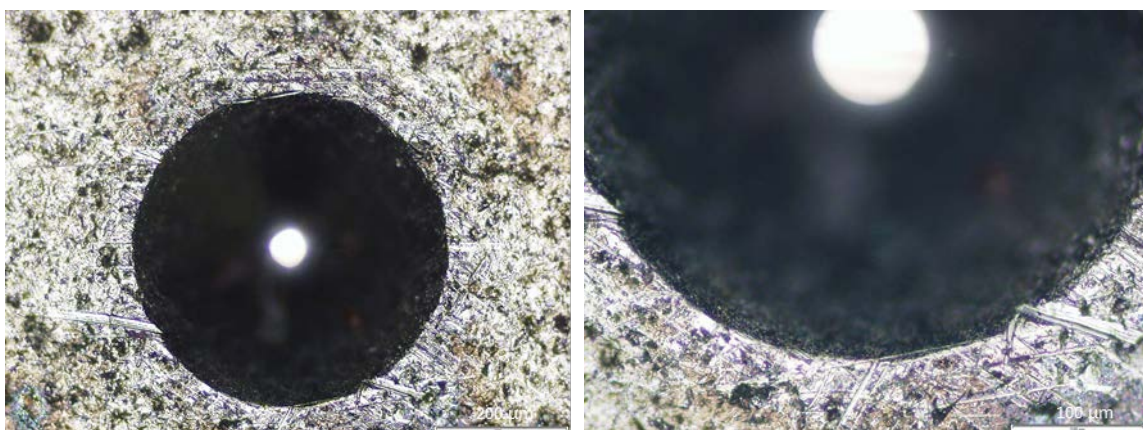
**B<sub>4</sub>C****Mo****TiAlN**

Figura 47 – Indentações Rockwell com uma carga de 150 Kgf, com uma ampliação de 100x (esquerda) e 200x (direita), respectivamente

Os resultados apresentados na Figura 47 estão de acordo com os obtidos pelo *scratch test*. Pela análise da figura, verifica-se um maior número de fissuras no bordo da indentação do filme CrCN, do que no dos restantes filmes. É possível observar a presença de uma quantidade pequena de fissuras na margem da indentação dos filmes WC e B<sub>4</sub>C, e a ausência de fissuras no filme de Mo. O filme TiAlN apresenta também ausência de fissuras no bordo da indentação. De acordo com a norma VDI 3198:1991 [42], o resultado obtido em todos os filmes pode ser classificado como comportamento 'HF1', o que traduz um padrão de adesão satisfatório, não existindo um destacamento de filme nas margens da indentação.

Os resultados de indentação podem ser mais precisos do que o *scratch-test* devido à menor influência da rugosidade da superfície, e porque o aumento da carga normal é mais lento. Portanto, pode-se concluir que todos os revestimentos têm uma boa adesão.

#### 3.4.1.5 Microdureza

A dureza (H) e o módulo de Young foram determinados por uma indentação de Vickers. Devido à baixa espessura do filme, alguns cuidados tiveram de ser tomados durante as medições de dureza. De forma a contornar este problema, foi selecionada uma carga extremamente baixa (50 mN), garantindo assim, que a profundidade de indentação fosse inferior a 10% da espessura do revestimento, evitando a influência do substrato [44-45]. O problema de recuperação elástica, foi contornado mantendo constante a carga máxima por 30 s. O resumo dos resultados obtidos da microdureza para os revestimentos em estudo, é mostrado na Tabela 20.

Tabela 20 – Micro-dureza e Módulo Young dos revestimentos em estudo

Revestimento	Dureza H [GPa]	Módulo de Young	
		Er [GPa]	E' [GPa]
CrCN	14,1 ± 1	235,4 ± 20	284,8 ± 33
WC	37,5 ± 8	311,1 ± 25	415,3 ± 48
B <sub>4</sub> C	41,7 ± 5	319,7 ± 25	433,9 ± 46
Mo	11,4 ± 2	267,4 ± 15	336,3 ± 24
TiAlN	13,2 ± 3	236,2 ± 34	287,2 ± 55

O valor de dureza obtido para o filme CrCN foi 14,1 GPa, sendo mais baixo que o registado por outros investigadores (20 a 30 GPa) [65-66]. Por outro lado, o valor de dureza obtido para o filme WC foi 37,5 GPa, sendo ligeiramente superior à maioria dos valores referidos na literatura (14 a 22 GPa), o que induz concluir que o filme de WC depositado possui uma camada com uma estrutura densa [29, 64]. O resultado de dureza obtido para o revestimento B<sub>4</sub>C (41,7 GPa) é ligeiramente superior à ampla

gama de valores referidos na literatura (25 a 37 GPa) [67-69]. De acordo com Moshtaghioun [70] a dureza varia com o tamanho de grão. Menores durezas correspondentes a menor tamanho de grão está relacionada com um comportamento conhecido como *'inherent inverse Hall-Petch'*. À semelhança do filme CrCN, a dureza obtida para o filme de TiAlN (13,2 GPa) é bastante inferior ao referido na literatura: 21 a 36 GPa [35, 71-72]. Esta diferença poderá ser justificada com a estrutura do filme menos compacta, poderão estar implícitas diferenças de fases, bem como diferentes estruturas (amorfa e/ou cristalina) ou simplesmente devido a uma estequiometria diferente entre Al e Ti.

#### *3.4.1.6 Análise do comportamento tribológico e ao desgaste do revestimento para a configuração 'bloco-em-pista'*

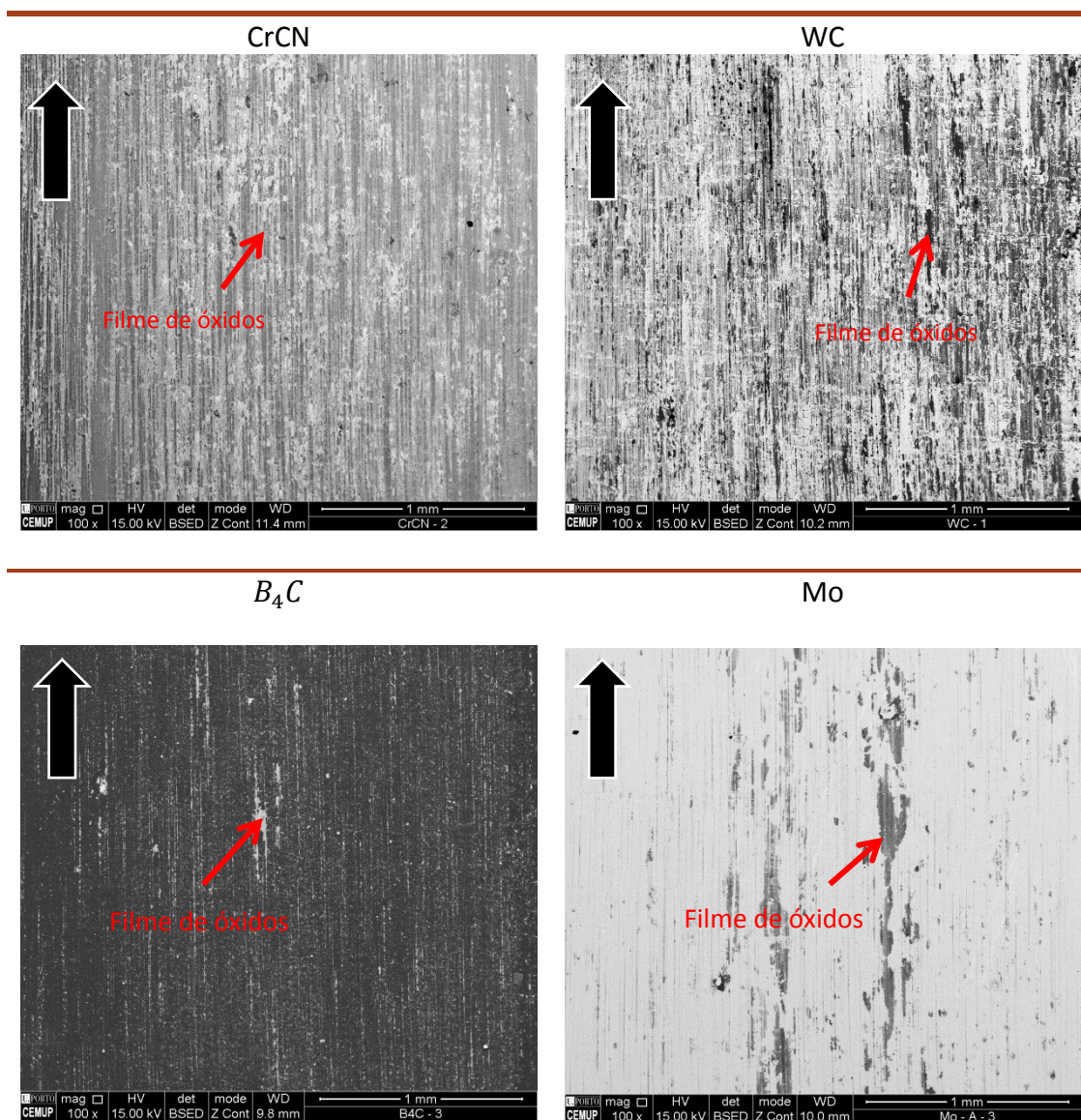
Como referido anteriormente, a caracterização tribológica foi realizada utilizando uma configuração de bloco em pista num tribómetro de Blouet. A totalidade da superfície da pista foi utilizada, tendo sido realizados três testes em cada uma delas. As amostras foram devidamente identificadas, para que fosse mantida a rastreabilidade. Durante os testes, os dados sobre a força de atrito foram recolhidos e registados, permitindo o tratamento de dados adicionais quanto à evolução do atrito, através de um gráfico que indica a força de atrito como função do tempo/distância de deslizamento. A avaliação quantitativa da perda de massa não foi considerada, porque se esperava uma transferência de massa entre amostras, devido à diferença de dureza entre essas superfícies, e correspondente aumento do peso da superfície mais dura. Assim, a transferência de estanho da superfície da FF para a pista revestida foi considerada mais importante que o peso perdido.

Após cada teste, os blocos e as pistas foram cortados por EDM, preservando todos os sulcos e cicatrizes gerados durante os testes de desgaste, permitindo a montagem dessas amostras de pista no suporte SEM com o lado externo destas voltado para o feixe de electrões. A amostra de FF colada a cada bloco foi removida, também para observação em SEM. De salientar que o teste foi realizado com a superfície de FF em contacto com o revestimento, tendo sido repetida três vezes para cada revestimento, a fim de analisar a reprodutibilidade dos resultados.

A caracterização tribológica foi efectuada com três tipos de FF (Arcelor, Baoshan e Zyposco) para que se percebesse se existiria alguma diferença entre fornecedores na transferência de estanho para a superfície do revestimento durante o ensaio. Os resultados indicaram que não se observam diferenças de comportamento entre os diferentes fornecedores, pelo que serão apresentados apenas os resultados obtidos com o fornecedor Arcelor. A restante informação poderá ser encontrada no ANEXO 3 – Imagens SEM e EDS superfície revestimento tribómetro Blouet.

A Figura 48 apresenta as imagens de SEM recolhidas na superfície da pista revestida após o ensaio. É possível observar uma grande tendência para a criação e ancoragem de filmes de óxido nos revestimentos CrCN, WC e  $B_4C$ . A menor transferência de estanho para a superfície do revestimento Mo está relacionada com a incompatibilidade metalúrgica entre o estanho (como pode ser observado no diagrama de fase Sn-Mo), bem como à característica auto-lubrificante do filme de Mo.

O revestimento de TiAlN foi o único que não apresentou na sua superfície estanho transferido da FF. Em contrapartida, apresenta um ligeiro desgaste do filme, tendo ficado exposto o substrato. Na análise da Figura 48, é também possível observar uma pista central onde se conseguem identificar marcas ligeiras de desgaste, e na zona esquerda identifica-se um desgaste mais severo, de tal forma crítico, que deixa exposto o substrato. Por isso, o TiAlN parece ser o mais adequado, em relação aos revestimentos estudados, para aplicação em ferramentas de estampagem.



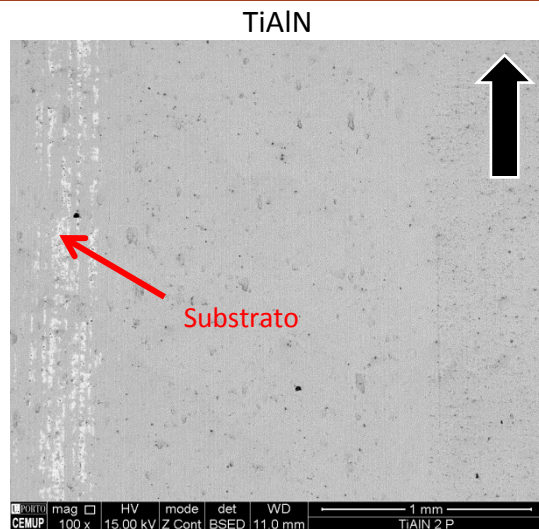


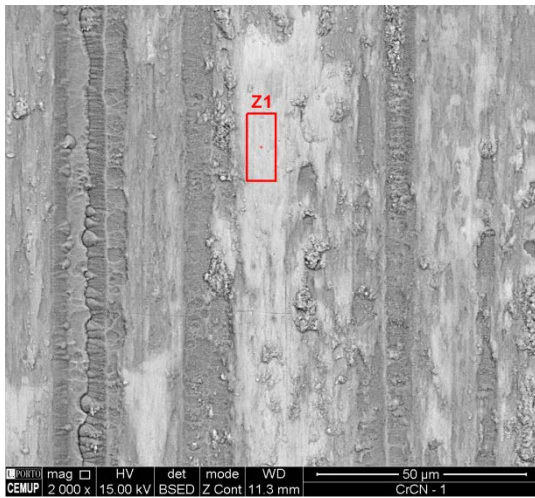
Figura 48 – SEM da superfície das pistas após contacto com a FF no tribómetro de Blouet (a direção de deslizamento está identificada com seta preta)

O material transferido foi identificado e caracterizado usando EDS. O objetivo da realização da análise EDS foi detetar o tipo de elementos presentes em ambas as superfícies (pistas revestidas e FF colada ao bloco). Os filmes de óxidos mostram diferentes tons, devido à diferente densidade dos revestimentos, sendo a sombra uma tonalidade relativa.

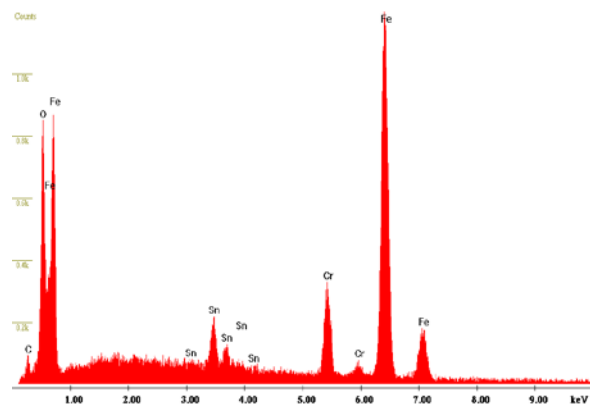
Fazendo o estudo das imagens obtidas por SEM das pistas ensaiadas, conclui-se que a transferência de estanho segue um padrão muito similar em todos os revestimentos, e não se observam características dissimilares entre as FF dos três fornecedores, como referido anteriormente. Como se pode verificar pela análise dos espectros da Figura 49, a composição predominante do material na superfície da pista é o estanho, proveniente da superfície da FF. Na verdade, o desgaste adesivo pode ser observado, bem como muitos sulcos seguindo a direção do movimento.

Além disso, na superfície da pista é possível observar a formação de filmes aderentes, compostos por partículas de desgaste libertadas pela FF, e óxidos formados durante o contacto. A libertação destas partículas contribui para uma rugosidade crescente nas superfícies de contacto, devido a fenómenos de abrasão. Durante os testes, o desprendimento de camadas parciais de óxido ocorre da FF para a pista revestida, causando uma redução quase instantânea do coeficiente de fricção, traduzida durante o registo da força de atrito. Também durante os testes, a transferência de partículas de revestimento da superfície revestida da pista para a superfície da FF teve lugar, conforme descrito mais adiante.

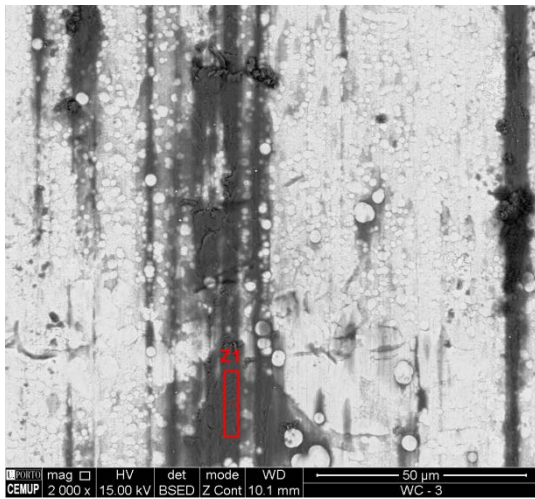
CrCN



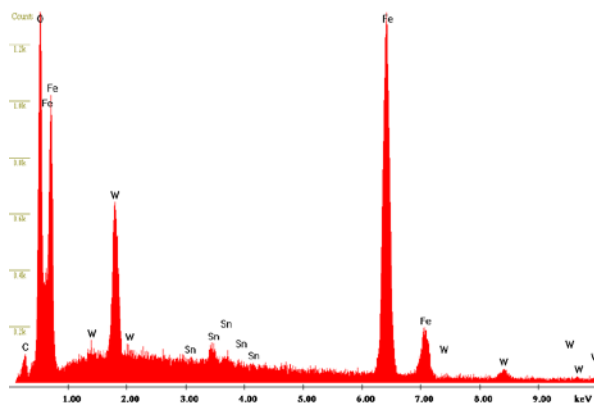
Label A: CEMUP 15keV CrCN - 1 Z1



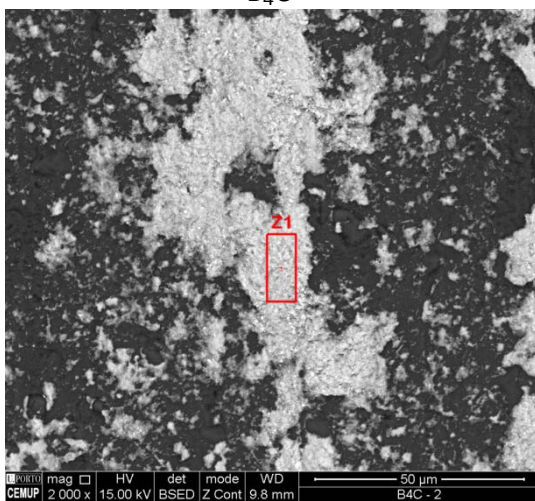
WC



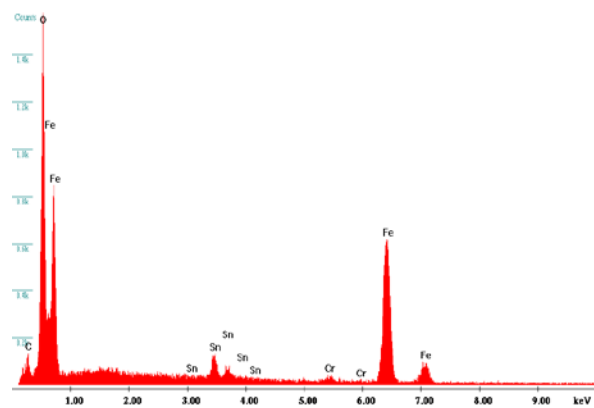
Label A: CEMUP 15keV WC - 3 Z1



B<sub>4</sub>C



Label A: CEMUP 15keV B4C - 3 Z1



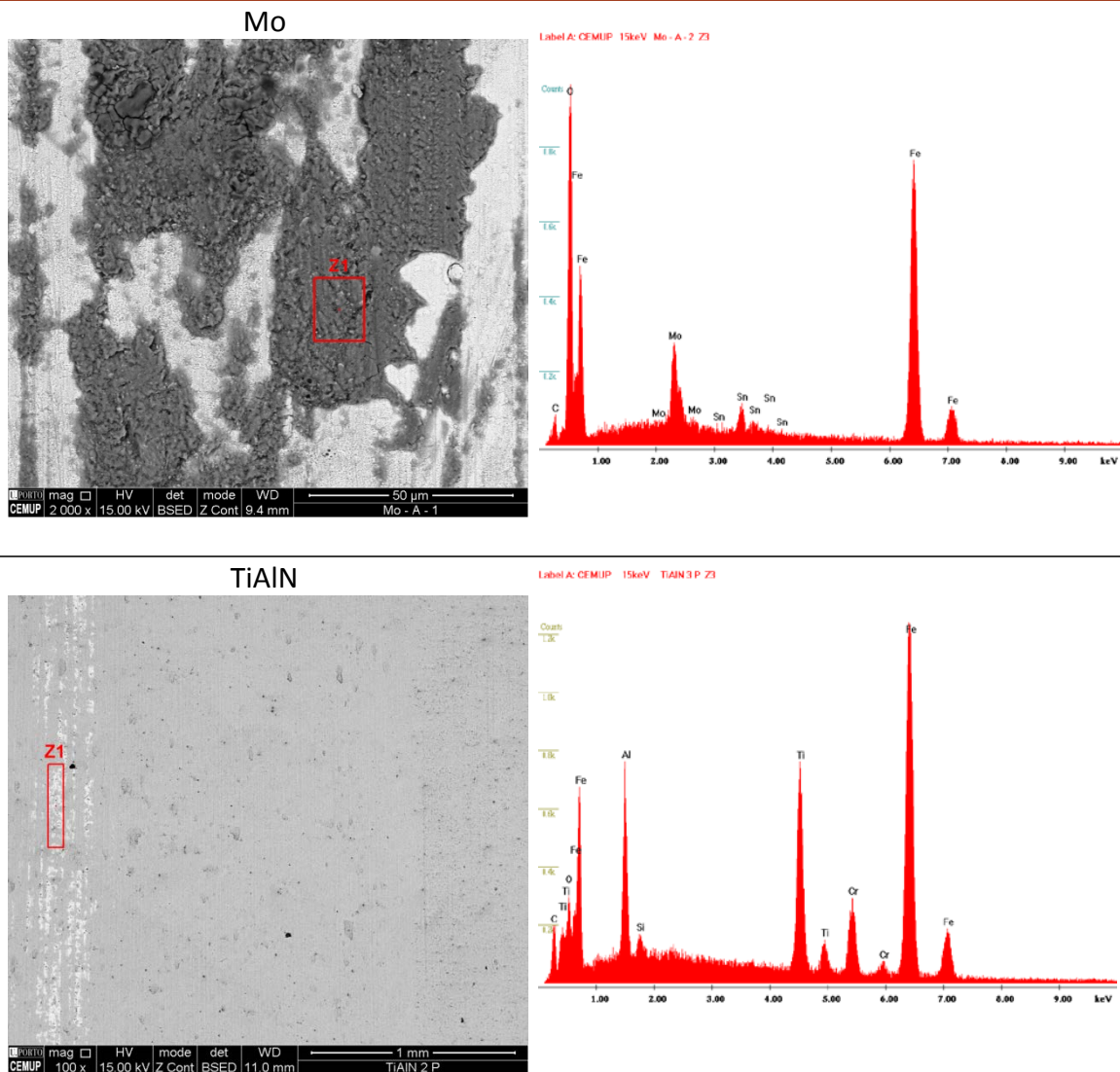


Figura 49 – Imagem SEM e respectivos EDS na superfície da pista revestida após contacto com FF

Outro elemento significativo encontrado, na maioria dos revestimentos, e na superfície das pistas foi o ferro, em conjunto com o estanho transferido, sugerindo que houve transferência de aço do substrato da FF para a superfície da pista. Ao usar a expressão da Kanaya-Okoyama apresentada em Goldstein [73], é possível calcular a espessura máxima que pode interferir no sistema de deteção. Portanto, neste caso pode-se dizer que o ferro é proveniente da FF porque o valor calculado é de 0,98 mm, tendo em consideração o peso específico do Mo, claramente menor que a espessura do revestimento em análise (~5  $\mu\text{m}$ ). A exceção será o TiAlN, o Fe apresentado no espectro pertence ao aço substrato, tal como o elemento Cr que também é destacado no espectro. Assim, o conjunto de parâmetros utilizados nos testes de desgaste parecem ser suficientemente severos para produzir uma transferência completa do estanho da FF colada no bloco para a superfície da pista.

Seguidamente procedeu-se à análise SEM da superfície de contacto da FF, permitindo observar que o comportamento é similar em todos ensaios, sendo o contacto do tipo conforme, em que existe uma área onde o contacto parece ser mais intenso e onde existiu um movimento de estanho do centro do contacto para a área periférica, como pode ser visto nas Figuras 50 a 54 (restantes análises podem ser encontradas no ANEXO 4).

Assim, através das imagens e dos espetros EDS, pode-se observar uma zona central onde o estanho desapareceu (Z2), uma zona periférica onde algum estanho ficou acumulado juntamente com resíduos finos do revestimento (correspondente à margem próxima à zona de contacto) (Z3) e a FF original, fora da zona de contacto (Z1).

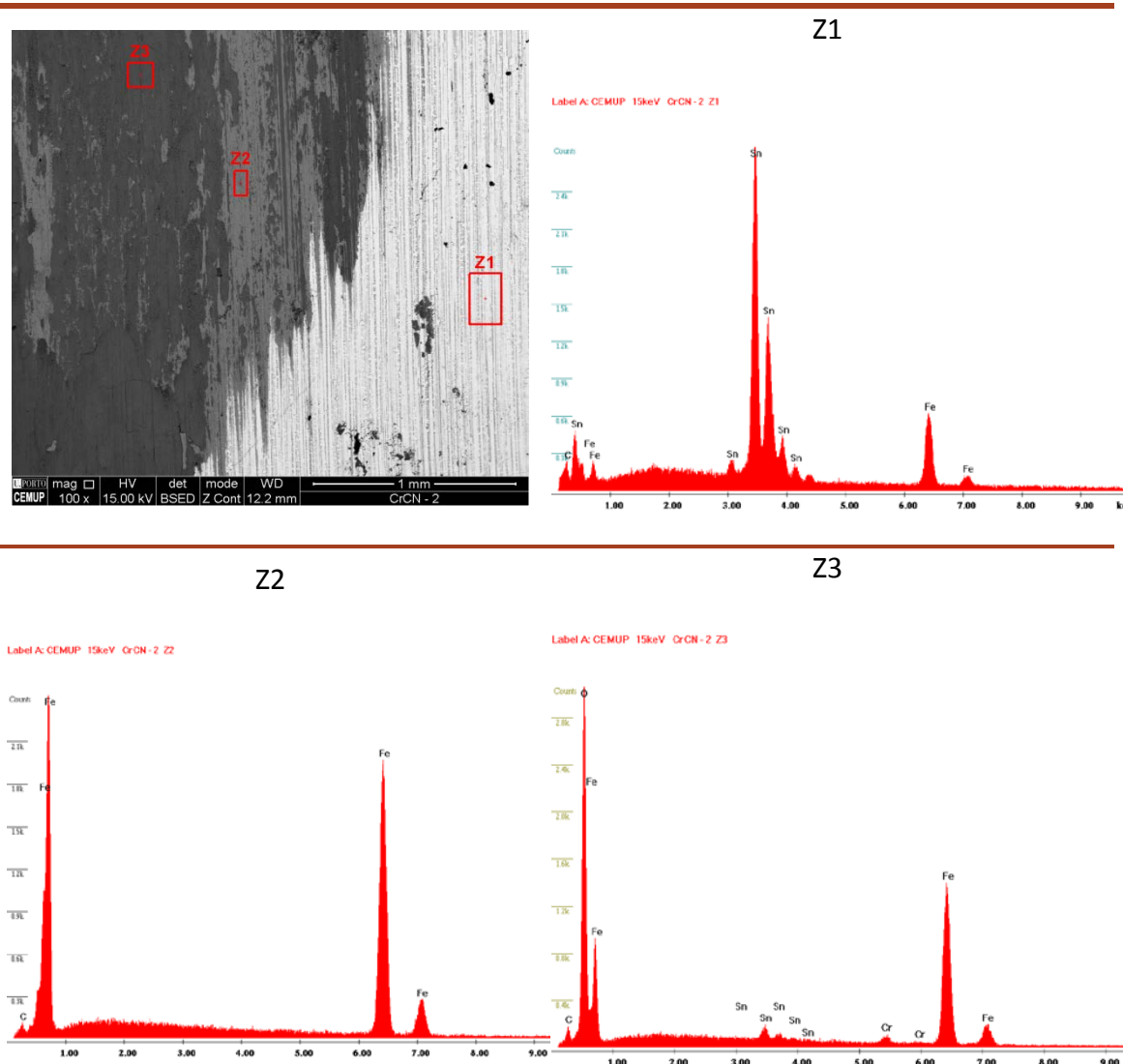


Figura 50 – Imagem SEM e respectivos espetros da FF após ensaio de desgaste no tribómetro de Blouet com revestimento CrCN

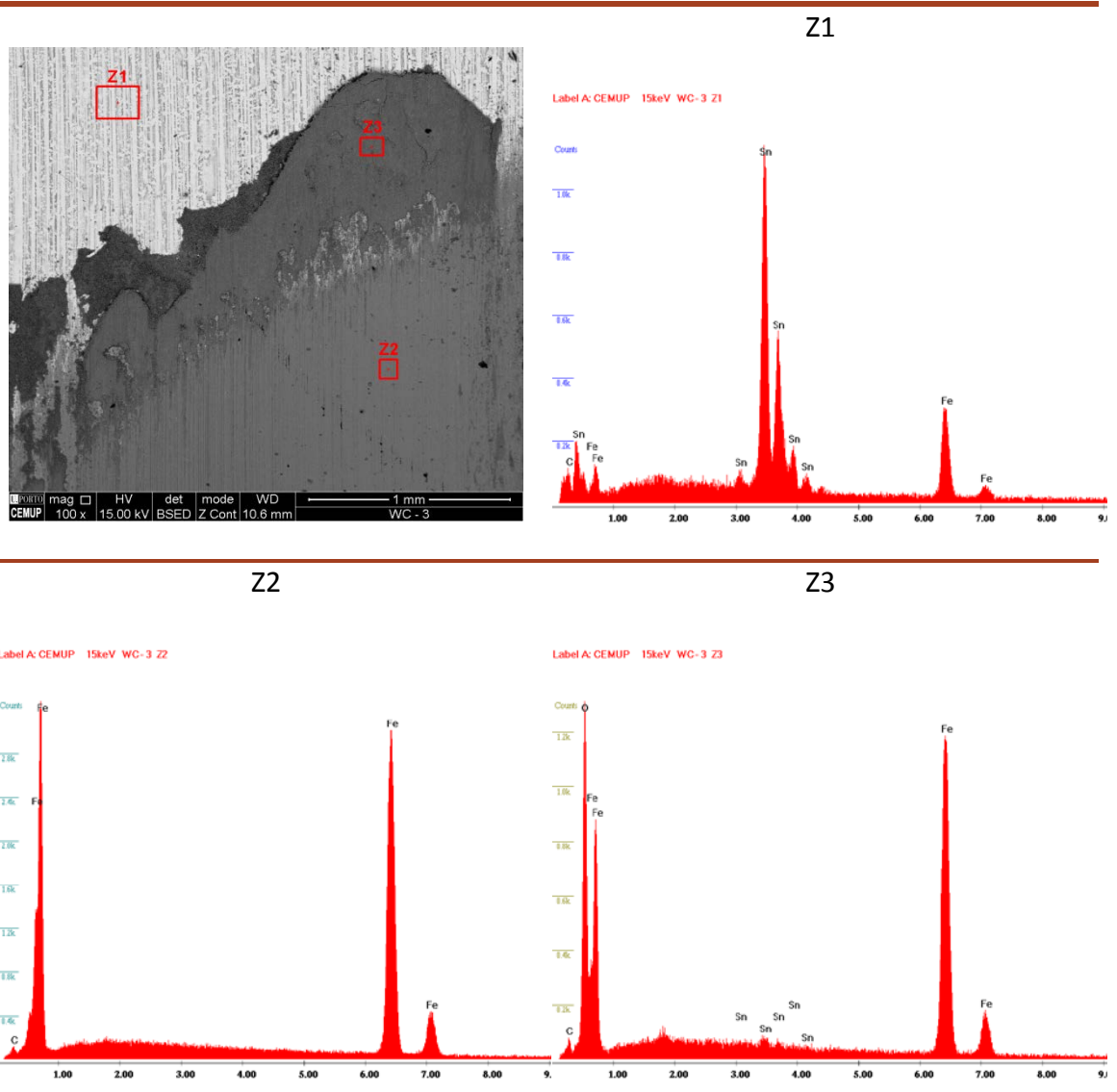


Figura 51 – Imagem SEM e respectivos e espetros da FF após ensaio de desgaste no tribómetro de Blouet com revestimento WC

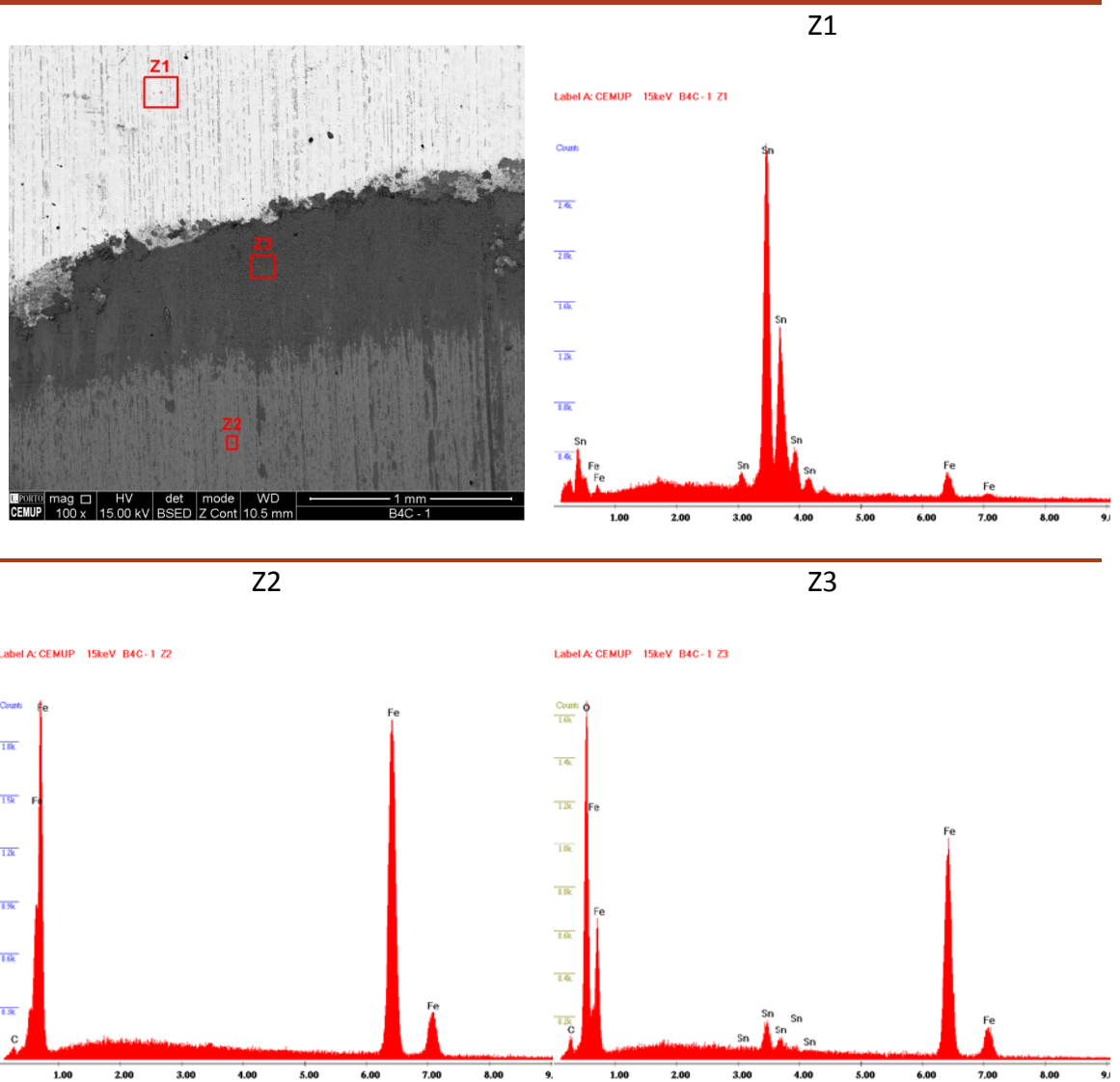


Figura 52 – Imagem SEM e respectivos e espectros da FF após ensaio de desgaste no tribómetro de Blouet com revestimento B<sub>4</sub>C

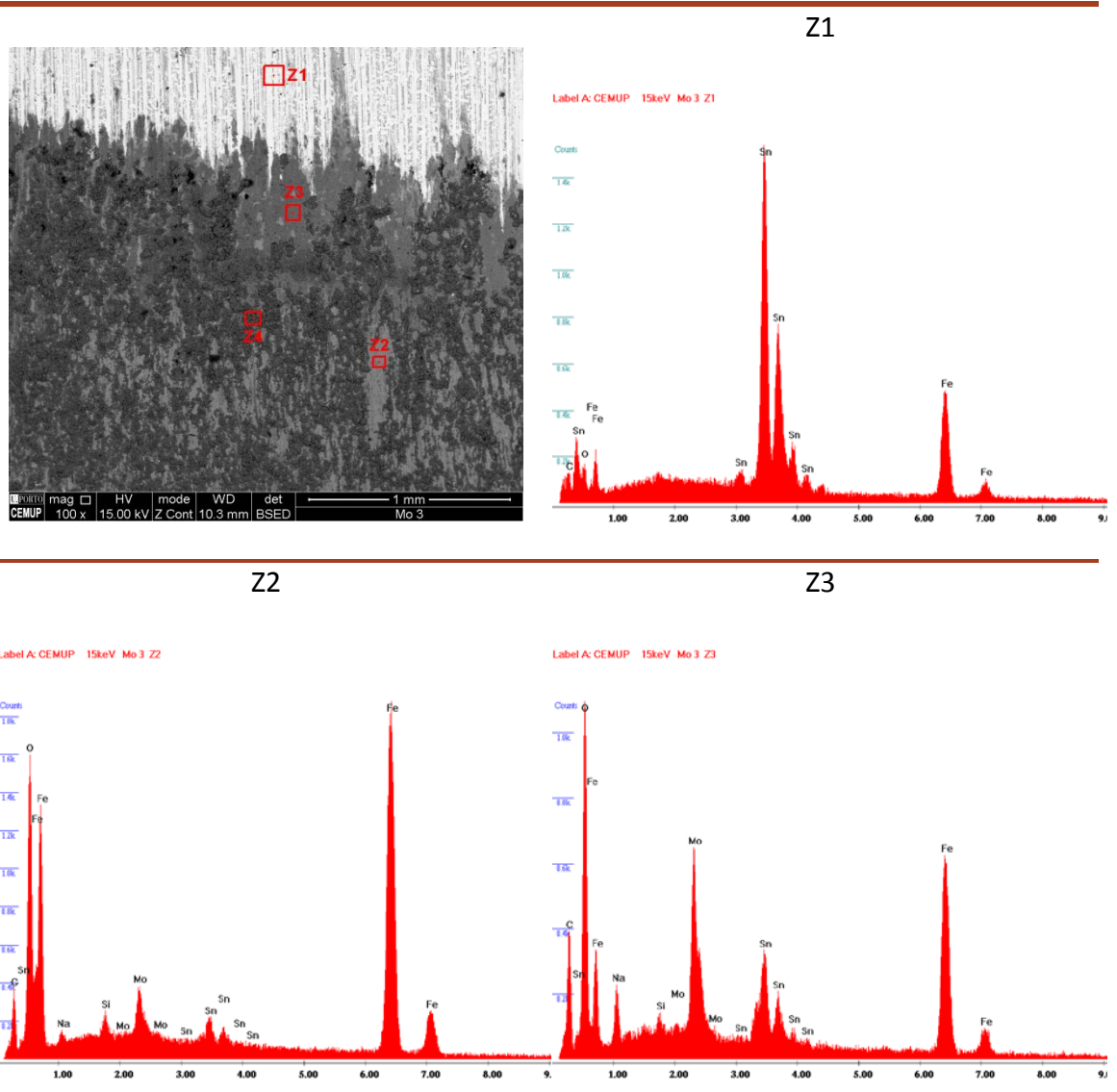


Figura 53 – Imagem SEM e respectivos e espectros da FF após ensaio de desgaste no tribómetro de Blouet com revestimento Mo

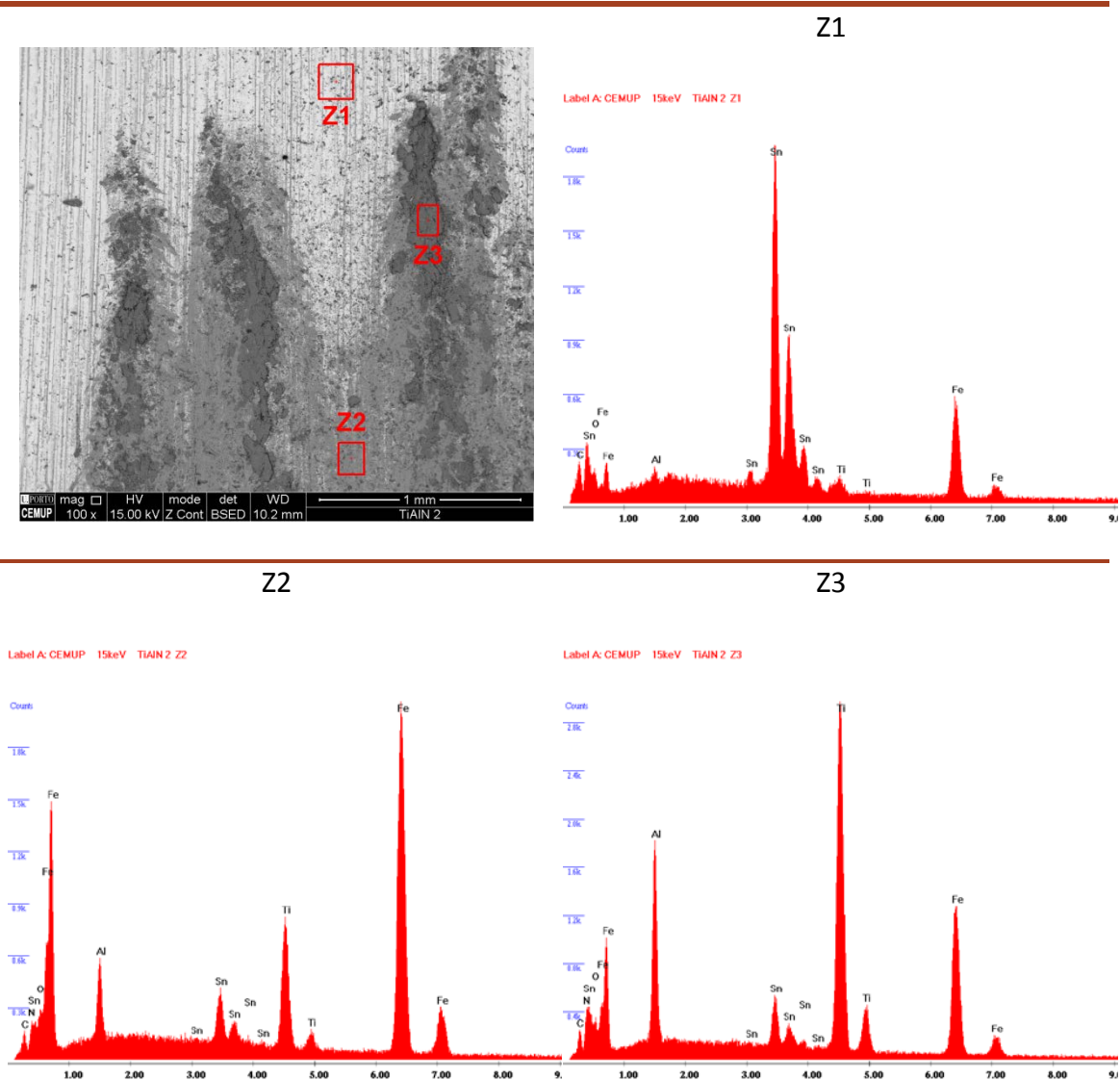
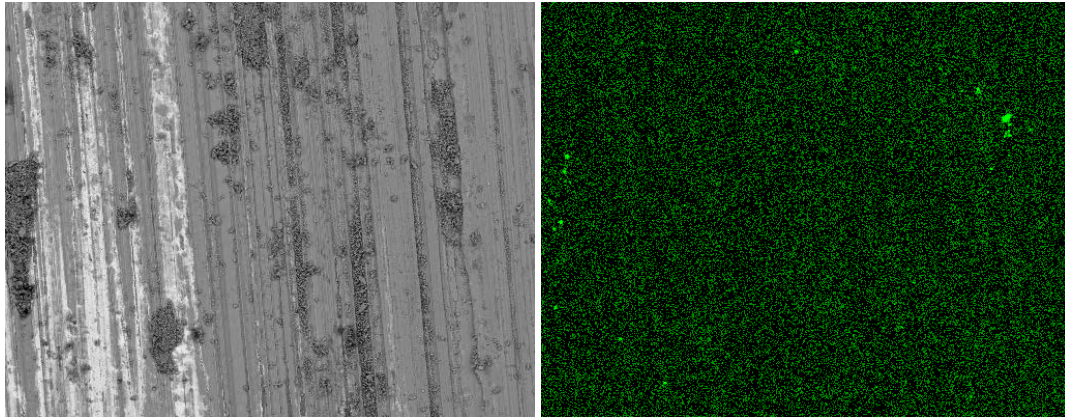


Figura 54 – Imagem SEM e respectivos e espectros da FF após ensaio de desgaste no tribómetro de Blouet com revestimento TiAlN

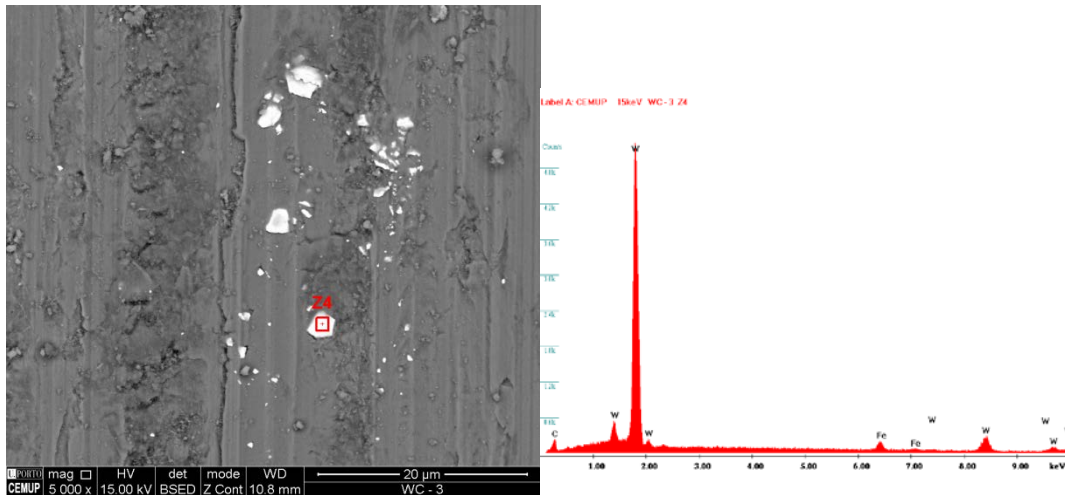
Como os revestimentos de Mo e TiAlN apresentam uma alta adesão ao substrato, o comportamento ao desgaste e transferência do material são diferentes dos restantes, ficando incorporados nas lamelas de óxidos que são formadas durante o contacto. Nos revestimentos CrCN, WC e B<sub>4</sub>C, observa-se que quando submetidos a cargas normais, o substrato tende a deformar e os revestimentos tendem a desenvolver pequenas fissuras. Nestas fissuras, o revestimento tende a separar-se do substrato e a ser arrastado ao longo do contacto, sendo parcialmente absorvido pelo estanho da FF que, em simultâneo está a migrar da FF para o revestimento, mas numa escala superior. As partículas de revestimento que não são totalmente incorporadas pelo estanho, comportam-se como um terceiro elemento no contacto, gerando abrasão ao serem arrastadas no contacto. A Figura 55 apresenta as imagens SEM onde se identificam as

partículas de revestimento que se destacaram e ficaram ancoradas na superfície da FF, bem como a dificuldade em identificar partículas dos revestimentos Mo e TiAlN.

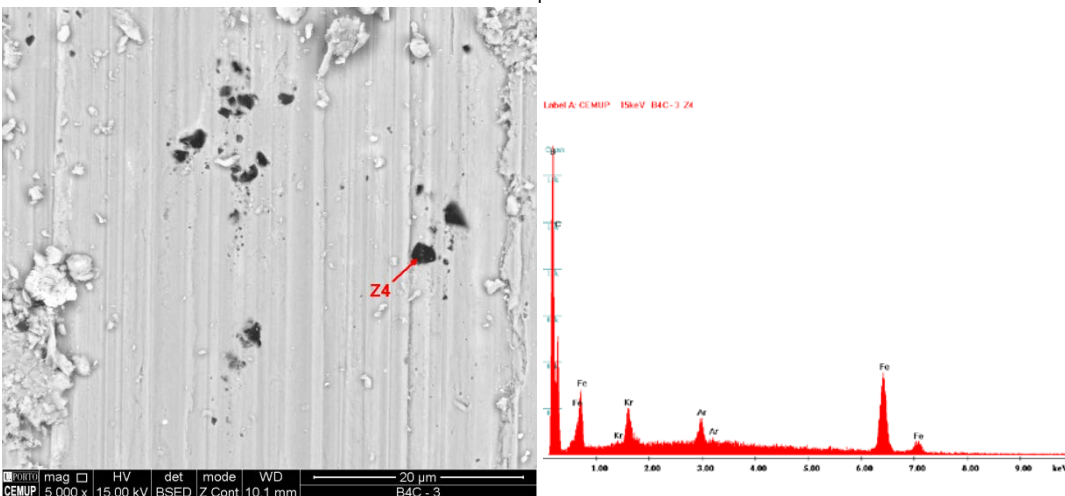
CrCN



WC



B<sub>4</sub>C



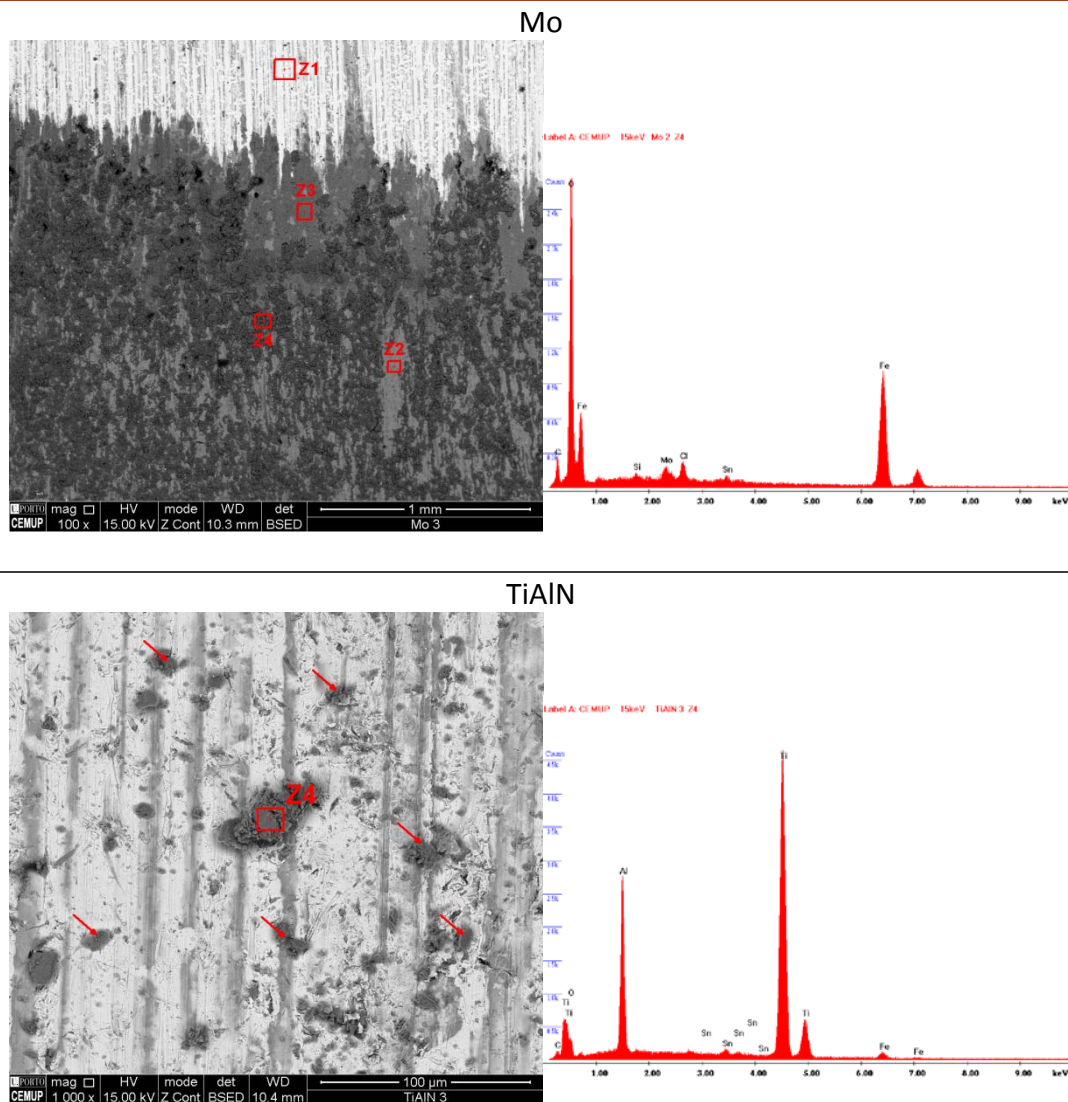


Figura 55 – Imagem SEM e respectivos espectros das partículas de revestimento na superfície da FF (bloco)

De forma a poder-se identificar as partículas de CrCN na superfície da FF e, visto que o Cr entra na composição do aço correspondente ao substrato da FF, teve de se fazer recurso ao mapa de raios-X, como se pode verificar na Figura 55. Nos revestimentos WC e B<sub>4</sub>C é possível distinguir claramente as partículas de revestimento que migraram da pista para a superfície da FF. Por outro lado, as partículas de TiAlN aparentemente incorporaram-se no estanho, em vez de ficarem ‘incrustadas’ na superfície, como os dois revestimentos anteriores. Contrariamente a estes, o revestimento Mo gera uma lama de óxidos, portanto não é possível a distinção perfeita de partículas de Mo como nos restantes revestimentos. No que diz respeito à discussão anterior, devido à diferença estreita entre a dureza do revestimento de estanho e o Mo, o revestimento de Mo parece apresentar um comportamento passível de se adequar à aplicação em ferramentas de estampagem.

A força de atrito foi adquirida usando uma placa *National Instruments* (NI-DAQ), sendo a força de atrito analisada via *software Labview® 4.0*, instalado num computador dedicado a este sistema e os dados gravados numa folha do *Microsoft Excel®*.

Relativamente aos valores fornecidos pelo *Labview®*, é possível observar que existe uma tendência descendente na força de atrito no  $B_4C$ , com picos distribuídos durante a duração do teste, o que pode representar um fenómeno de clivagem da camada de óxido, o que implica uma queda momentânea do atrito. A diminuição geral do coeficiente de atrito pode estar relacionada, precisamente, com a presença de óxidos e camadas de carbono formados na superfície durante o teste, as quais promovem uma ligeira diminuição da força de atrito.

Quanto à análise da força de atrito, o molibdénio apresenta um comportamento relativamente estável ao longo do teste. Durante os testes tribológicos, os óxidos de molibdénio são produzidos e libertados constantemente, levando a um comportamento mais estável no deslizamento entre a pista e a FF, o qual apresenta variações insignificantes durante o teste. No entanto, como esperado, foi observado um coeficiente de atrito com o revestimento de Mo inferior relativamente aos restantes revestimentos, devido à formação fácil e comum de óxidos de Mo com estrutura hexagonal. Estes promovem uma melhor libertação de camadas de óxido, acompanhadas de uma rápida formação de óxidos e mantendo uma taxa de formação desses óxidos bastante semelhante à taxa de libertação.

Os resultados do coeficiente de atrito são apresentados na Tabela 21, mostrando que o  $B_4C$  está ligeiramente acima do valor geralmente referido na literatura (0,03-0,9) [74-76]. Embora a literatura sobre o revestimento Mo seja muito escassa, Suszko *et al.* [77] estudou as propriedades tribológicas dos filmes nanocompósitos de nitreto de molibdénio dopado com cobre ( $Mo_2N/Cu$ ) a várias temperaturas, resultando em coeficientes de fricção entre 0,4 e 0,9. Tang *et al.* [78] refere valores de coeficiente de atrito para filmes multicamada Mo-N na faixa dos 0,6-0,9. O resultado do revestimento de Mo é destacadamente inferior aos obtidos nestes estudos. Considerando o tipo de filmes e as condições de ensaio, torna-se difícil a comparação entre os resultados obtidos e os referidos na literatura.

Sentiu-se a mesma dificuldade com o filme WC. Não foi encontrada informação sobre revestimentos WC para comparar com os resultados obtidos, mas os filmes de WC/C analisados por Wanstrand *et al.* [79] permitiram obter coeficientes de atrito na faixa dos 0,1 e 0,4, quando testado contra aço. Além disso, os revestimentos com base em WC são actualmente produzidos com recurso a outras técnicas de deposição, como a pulverização térmica (HVOF – *High-Velocity Oxygen Fuel*), impossibilitando a comparação com os resultados deste trabalho.

No que respeita ao revestimento de  $TiAlN$ , Chauhan *et al.* [80] reuniu informação sobre estudos das propriedades mecânicas deste tipo de revestimentos. Também Bukhaiti *et al.* [81] desenvolveu estudos sobre as propriedades tribológicas de um

revestimento multicamada de TiAlN. Os resultados obtidos com este estudo indicam um coeficiente de atrito de 0,18, ligeiramente inferior ao referido na literatura (0,25).

Tabela 21 – Valores médios do coeficiente de atrito obtidos em testes tribológicos realizados no tribómetro de Blouet

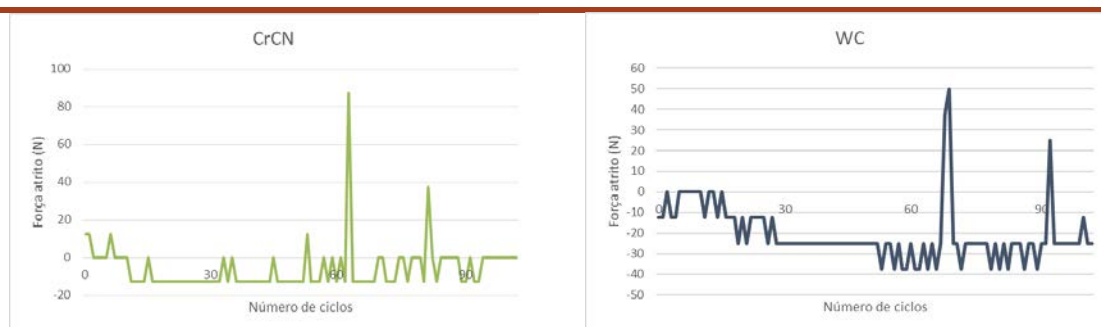
Coeficiente de atrito ( $\mu$ )	
<b>CrCN</b>	0,310 $\pm$ 0,080
<b>WC</b>	0,440 $\pm$ 0,016
<b>B<sub>4</sub>C</b>	0,150 $\pm$ 0,040
<b>Mo</b>	0,065 $\pm$ 0,007
<b>TiAlN</b>	0,180 $\pm$ 0,011

A variação da força tangencial em função do número de ciclos pode ser observada na Figura 56. Fazendo a análise dos gráficos, pode-se verificar que à excepção do Mo, os restantes revestimentos apresentam uma variação ao longo dos ciclos muito similar.

Como pode ser observado, após um período de rodagem para os revestimentos CrCN, WC e B<sub>4</sub>C, há uma estabilização seguida por um período instável, após 60 ciclos. O revestimento de Mo apresentou um comportamento mais estável até atingir 90 ciclos, quando se inicia um período instável, mantendo de qualquer forma uma baixa variação da força tangencial.

No que diz respeito ao revestimento TiAlN, verifica-se que até aos 30 ciclos existe uma grande variação da força tangencial, e após este período torna-se estável até ao final do teste.

Assim o revestimento TiAlN parece apresentar um comportamento mais estável no tempo, e com menor variação da força tangencial, sendo assim considerado o mais adequado para o contacto entre a FF e a superfície da ferramenta de estampagem.



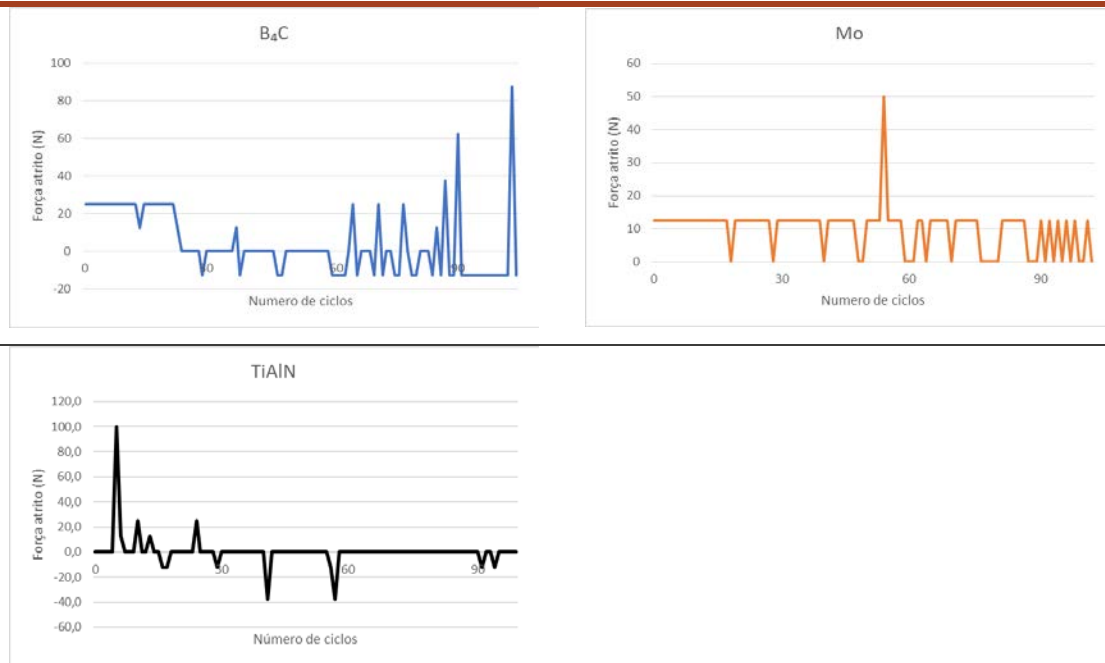


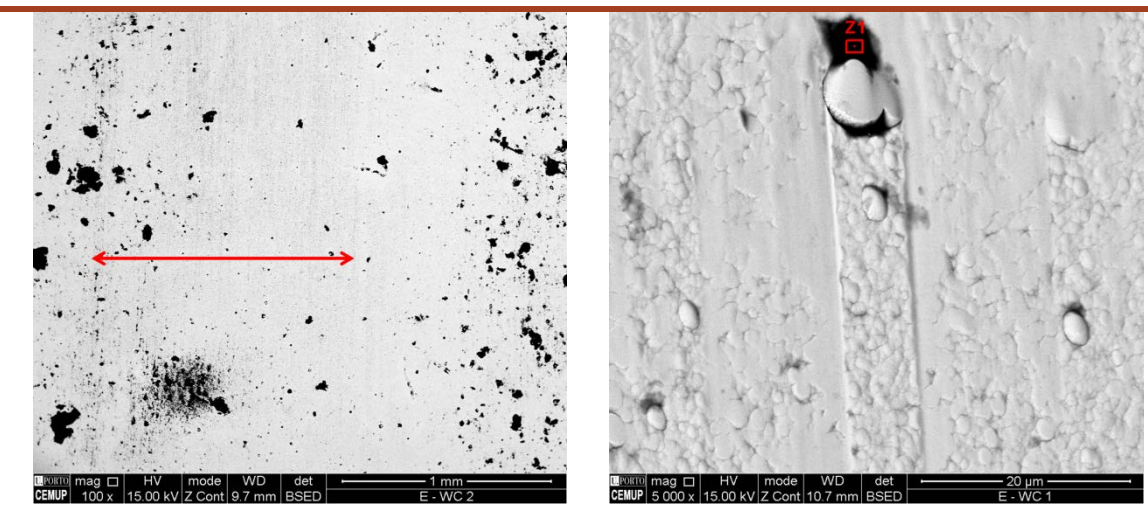
Figura 56 – Gráficos da evolução atrito ao longo dos ciclos

### 3.4.1.7 Análise do comportamento tribológico e ao desgaste do revestimento para a configuração 'esfera-em-bloco' (micro-abrasão por esfera rotativa)

Após a realização dos ensaios tribológicos, as crateras e pistas de desgaste produzidas durante os mesmos, foram observadas por microscopia de varrimento (SEM) com o objectivo de identificar os mecanismos de desgaste e transferência de estanho que ocorreram durante o processo (Figura 57 e Figura 58). O critério usado com as análises realizadas através dos ensaios efectuados no tribómetro de Blouet, foi também usado nas análises de desgaste na micro-abrasão por esfera rotativa. Foi considerada a avaliação qualitativa sobre o mecanismo de transferência de estanho da superfície de FF para a superfície do revestimento.

A pista de desgaste deixada na esfera de WC, identificada com as setas a vermelho, pode ser observada na Figura 57. Verifica-se que os aglomerados que se formaram durante o processo de deposição sofreram desgaste, protegendo a zona seguinte, havendo uma acumulação de detritos na zona dianteira do aglomerado. A micro-análise por EDS confirma que estes detritos são constituídos por óxidos que se formam durante o contacto. O mesmo comportamento foi observado para o filme de B<sub>4</sub>C.

Os revestimentos Mo e CrCN como apresentam uma superfície com uma distribuição colunar os detritos provocados pelo contacto provocam um desgaste superficial similar ao observado no revestimento TiAlN.



Label A: CEMUP 15keV E - WC 1 Z1

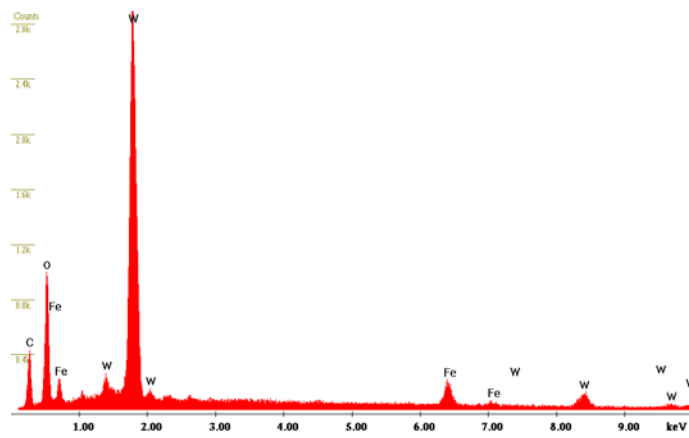
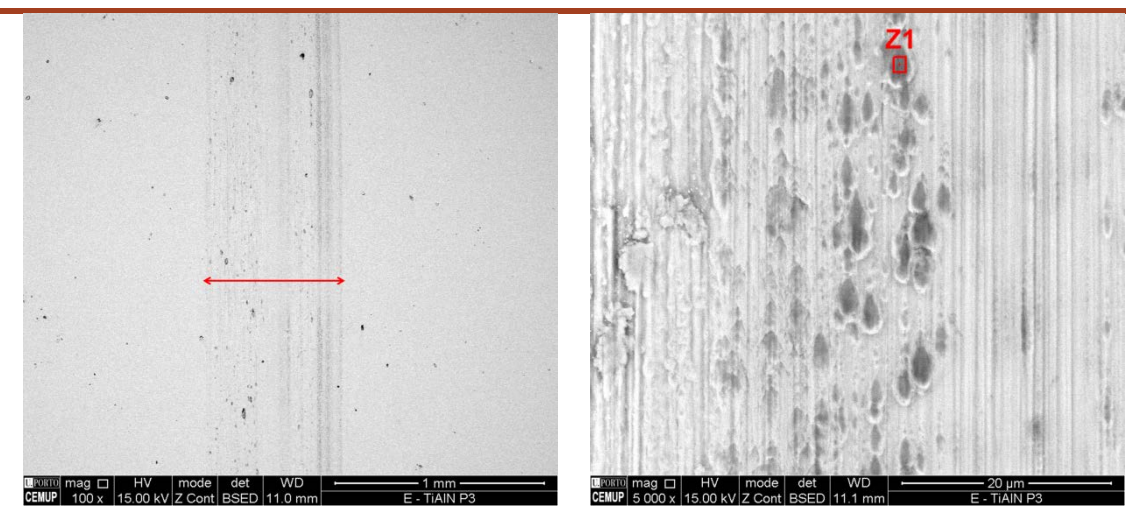


Figura 57 – Análise da superfície da esfera revestida com WC



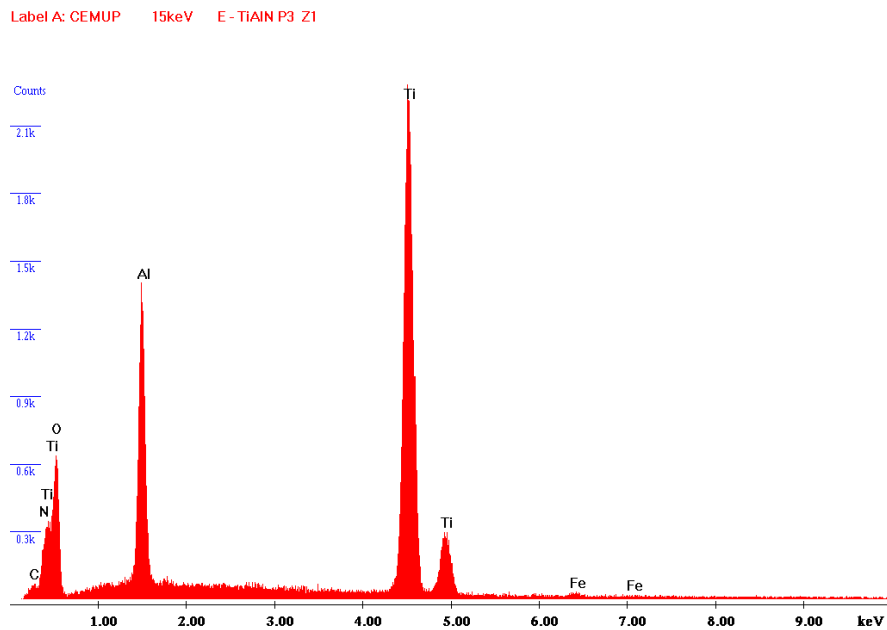


Figura 58 – Análise da superfície da esfera revestida com TiAlN

De uma forma geral, pela análise das pistas de desgaste, verifica-se que ocorre desgaste do revestimento e que há lugar a zonas de acumulação de lama de óxidos de ferro e estanho que migraram da FF. Verifica-se também que os aglomerados gerados durante o processo de deposição dos revestimentos, são zonas prioritárias de contacto e a sofrer desgaste, acumulando na sua zona dianteira a referida lama de óxidos.

A análise à cratera deixada na FF serve apenas como complemento de informação. O ensaio de desgaste foi desenvolvido com provetes de FF revestidos com litografia e verniz. Desta forma, todos os cenários existentes em produção poderiam ser simulados em laboratório, e assim, realizar-se uma caracterização mais completa e mais próxima do processo industrial. À semelhança do observado nas FF em contacto com as pistas no ensaio 'bloco-em-pista', verifica-se uma área de contacto mais intenso, onde existiu um movimento de estanho do centro do contacto para a zona periférica, como pode ser verificado na Figura 59. Nessa figura é possível observar uma zona central (Z1) onde o estanho desapareceu, deixando o substrato visível, uma zona periférica (Z2) onde a superfície da FF ficou desprotegida pelo revestimento de verniz, e uma zona onde as lamas de óxidos ficaram acumulados (Z3). O resultado apresentado do revestimento WC é representativo dos resultados obtidos para os restantes filmes, embora se verifique uma diferença na dureza dos revestimentos, todos apresentam as três zonas atrás descritas. Por estes motivos, apenas são apresentadas as imagens SEM e os EDS deste revestimento.

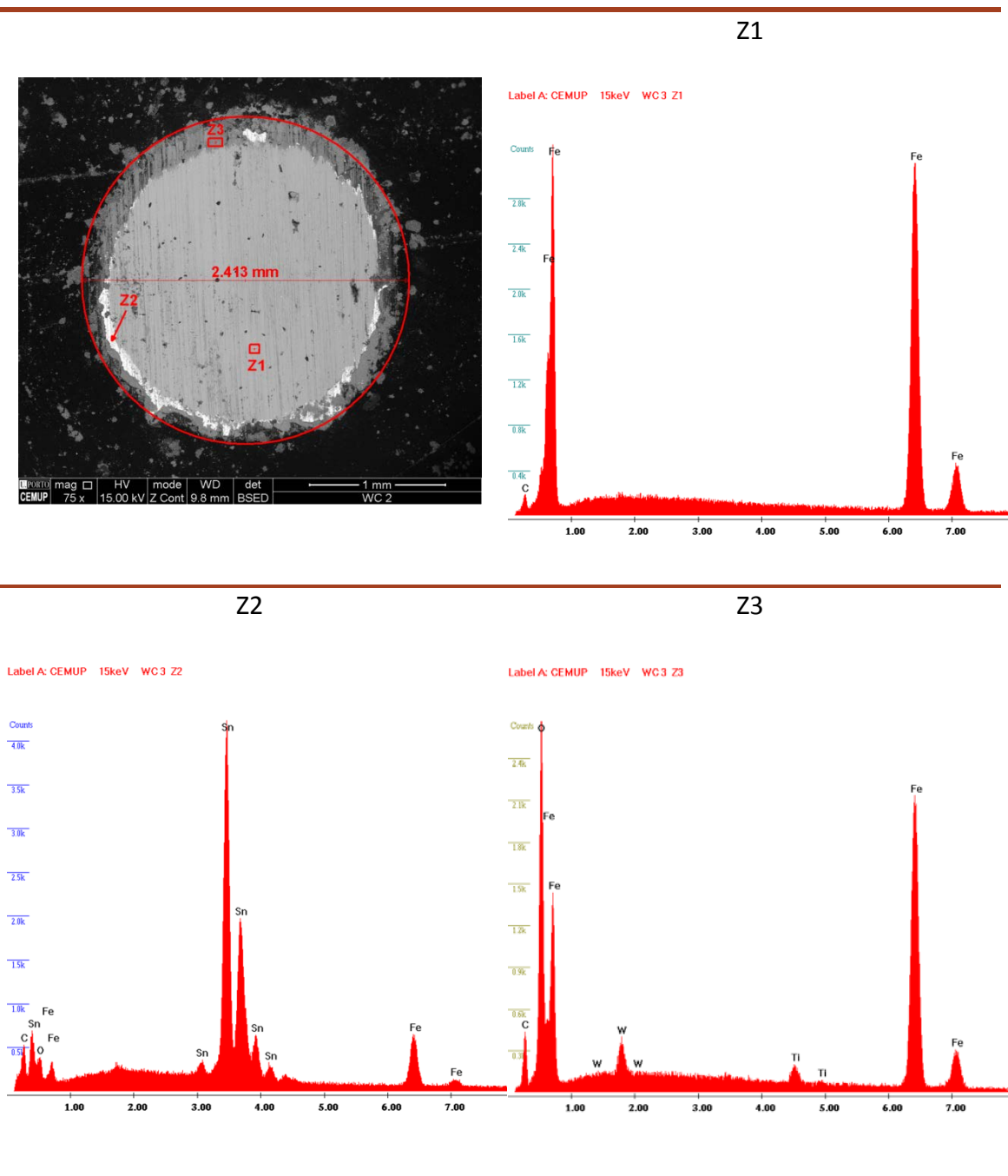


Figura 59 – Análise da superfície da FF em contacto com a esfera revestida com WC

### 3.4.2 Caracterização em serviço

No primeiro ensaio realizado em produção, a matriz revestida com TiAlN foi aplicada na prensa, mantendo o cunho e argola de enrolamento que estavam anteriormente na ferramenta (não revestidos). O sistema de lubrificação foi desactivado e o processo de estampagem foi desenvolvido nessas condições. O objectivo seria perceber se a transferência de estanho seria significativa em condições de temperatura mais baixas.

Este ensaio inicial teve uma duração limitada pela ordem de fabrico em curso. Foram realizadas análises termográficas de forma a clarificar qual o incremento de temperatura nas ferramentas, com uma câmara Fluke TiX560 que possui as características principais e intervalo de medição de temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+1200^{\circ}\text{C}$  e sensibilidade térmica de  $\leq 0,03^{\circ}\text{C}$  a  $30^{\circ}\text{C}$ . A Figura 60 apresenta as fotografias termográficas das ferramentas, revestida e não revestida, após 18 minutos de trabalho. Pode-se observar que a ferramenta revestida possui uma temperatura inferior em cerca de  $2^{\circ}\text{C}$  ( $22,8^{\circ}\text{C}$ ), comparativamente à ferramenta sem revestimento ( $24,4^{\circ}\text{C}$ ). Tal facto fica a dever-se à menor geração de atrito entre a FF e o anel da ferramenta revestido. Atendendo a que grande parte do calor é dissipado pela ferramenta e pela própria chapa, será fácil imaginar as vantagens em termos de coeficiente de atrito trazidas pela introdução do revestimento.

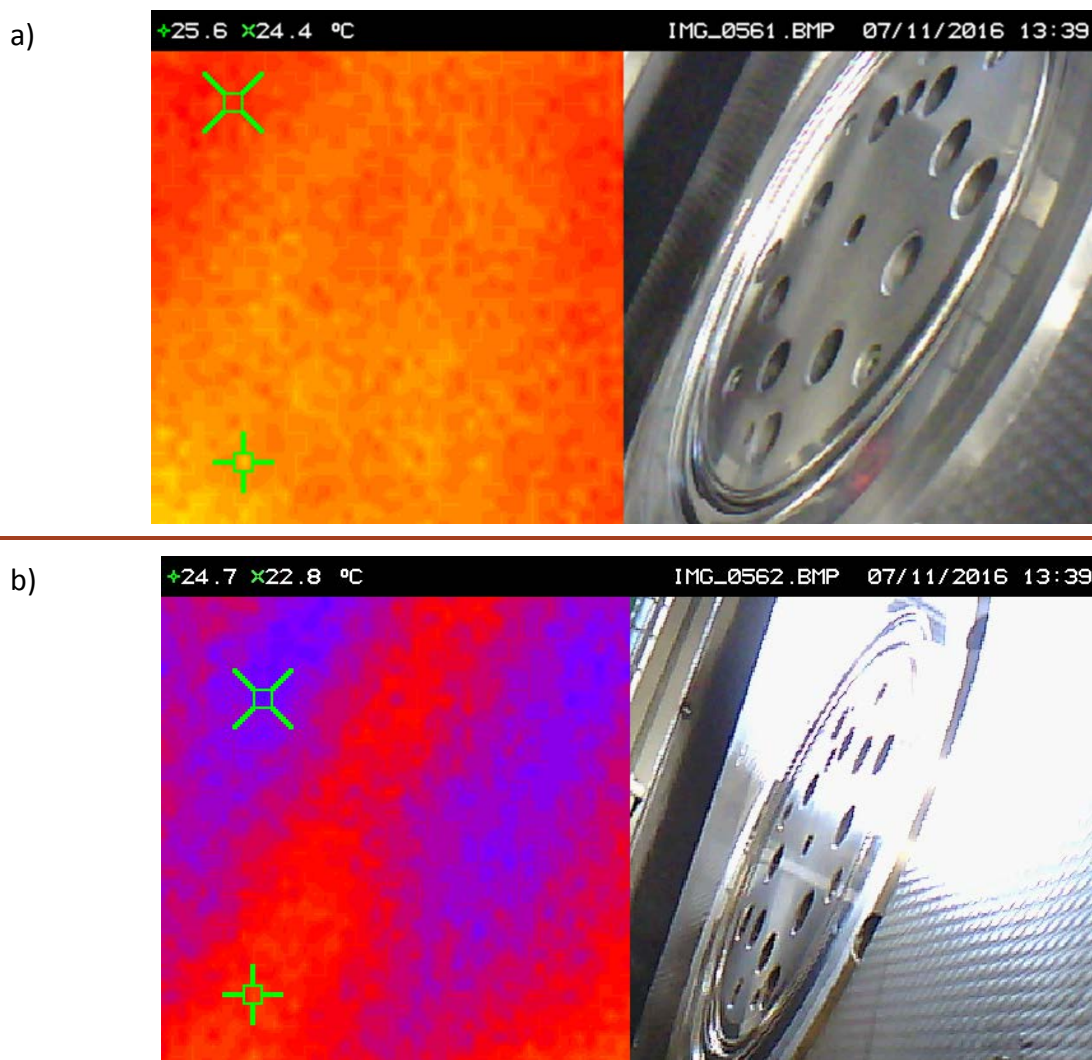


Figura 60 - Fotografias termográficas da ferramenta após 18 min de trabalho: a) temperatura ferramenta não revestida, b) temperatura ferramenta revestida

No final do primeiro ensaio, pela análise da superfície da ferramenta, podia-se observar um desgaste pouco significativo na zona central (Figura 61 - assinalado com setas a vermelho). Este desgaste provavelmente deve-se ao contacto com o centro superior no intervalo de FF (durante o processo em vazio), devido a um possível desgaste do perfil das ferramentas que já estavam em máquina.



Figura 61 - Aspecto da ferramenta revestida após 18 minutos de ensaio

O centro foi aplicado novamente em máquina, na mesma semana em que foi desenvolvido o primeiro ensaio e nas mesmas condições definidas para este, mantendo o cunho e argola de enrolamento que estavam na prensa (não revestidos), tendo sido igualmente mantido desativado o sistema de lubrificação.

Após 12 horas de produção, verifica-se que o desgaste inicialmente observado se acentua no final do primeiro ensaio. No entanto, foram produzidos 55.000 tampos sem recurso a lubrificante durante o processo de estampagem, e no qual não foram produzidos defeitos físicos (enrolamento da beira incompleto, enrugamento da folha, etc.). Foi possível extrair outra conclusão pela análise da superfície da ferramenta: apesar de se verificar desgaste no revestimento, não se verifica transferência de estanho da superfície da FF para a superfície da ferramenta (Figura 62).

Sabendo que a transferência de estanho da FF para a ferramenta aumenta a potência necessária à estampagem e o aumento do atrito entre ambas as faces, a consequência directa será a estampagem de tampos com defeitos funcionais e o aumento do desgaste mecânico da ferramenta.

Como os resultados obtidos em produção foram os pretendidos, deu-se início à terceira fase de ensaios e, desta vez, com uma ordem de fabrico com quantidade significativa para produção. A matriz usada nos dois ensaios anteriores, foi novamente aplicada em máquina nas mesmas condições de ensaio desenvolvidas anteriormente, sendo acrescidos mais 35.000 estampagens.



Figura 62 - Aspecto da ferramenta revestida após 55.000 tampos

O estado da ferramenta no final da produção de 90.000 tampos é surpreendente. Verifica-se um desgaste do revestimento, comportamento em concordância com o observado em laboratório. Como referido, durante os ensaios tribológicos, foi verificado um desgaste do filme de TiAlN, mas não se verificou transferência de estanho para a sua superfície. O mesmo comportamento foi obtido no processo industrial. A Tabela 22 apresenta os dados dos ensaios desenvolvidos em produção.

Tabela 22 – Dados dos ensaios em produção

		1º ensaio	2º ensaio	3º ensaio
<b>Força</b>		178 kN (força total do equipamento)		
<b>Tampos estampados</b>		3300 tampos	55 000 tampos	90 000 tampos
<b>Tempo de ensaio</b>		18 min	12 h	20 h
<b>Temperatura ambiente</b>		20°C	20°C	20°C
<b>Temperatura</b>	<b>Ferramenta revestida</b>	22,8°C		
	<b>Ferramenta não revestida</b>	24,4°C		

Os resultados em produção foram muito positivos, embora o desgaste precoce do revestimento irá representar um problema no que respeita à manutenção da ferramenta. Tendo por base o desgaste verificado, será expectável que a ferramenta

faça estampagem de cerca de 500.000 tampos, sem que seja necessária manutenção. Portanto, o estudo deverá ter continuidade, melhorando as propriedades do filme para que seja conseguida a resistência ao desgaste necessária, para que represente uma alternativa financeiramente viável.

# CONCLUSÕES



## 4 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste estudo permitiu o teste de cinco revestimentos diferentes, que se julgavam adequados para o processo industrial de estampagem de folha de flandres. O objectivo principal foi investigar o fenómeno de transferência de estanho dos diferentes revestimentos obtidos por PVD, simulando através de ensaios de desgaste o contacto entre superfícies revestidas e folhas de aço revestidas com estanho. Os revestimentos testados foram: CrCN, B<sub>4</sub>C, WC, Mo e TiAlN. Os revestimentos foram devidamente caracterizados em termos de morfologia, espessura, adesão, dureza, resistência ao desgaste e coeficiente de atrito. Os revestimentos foram testados com vista à aplicação em matrizes de estampagem, dedicadas à deformação plástica de folhas de aço revestidas com estanho, usualmente utilizadas em embalagens para aplicação alimentar.

Da análise dos testes laboratoriais realizados, foi possível extrair as seguintes conclusões:

- a. Todos os revestimentos apresentam excelente adesão ao substrato, tendo sido analisados por duas técnicas: *scratch* e indentação. Isto revela que os parâmetros de deposição PVD seleccionados estavam corretos, embora possam eventualmente ser otimizados no futuro;
- b. Os valores de dureza registados diferem dos valores divulgados na literatura. Os revestimentos B<sub>4</sub>C e WC apresentaram valores de dureza mais elevados, mas dentro da mesma gama, o que terá uma repercussão directa numa maior resistência ao desgaste, bem como um comportamento frágil no contacto mecânico. Por outro lado, a menor dureza dos restantes revestimentos conduzirá a um desgaste prematuro, forçando a uma manutenção mais regular;
- c. Verificaram-se propriedades tribológicas notáveis, assim como baixos coeficientes de atrito, com a generalidade dos filmes a exibir baixa capacidade de captação de estanho na contraface durante os testes tribológicos. A análise dos limites das cicatrizes indica que existiu transferência não só do estanho da superfície da FF, como do aço do seu substrato. A análise da superfície da FF revelou que os revestimentos com maior dureza apresentaram maior tendência a fissurar e a soltar partículas de filme que ficaram alojadas na superfície da FF. Nos revestimentos de menor dureza, também se verificou transferência de partículas de filme que ficaram incorporadas nas lamas de óxidos;
- d. A morfologia dos revestimentos de Mo e TiAlN parecem ser as mais adequadas para fins tribológicos, comparativamente aos restantes. Os filmes B<sub>4</sub>C e WC, por sua vez, possuem aglomerados nas suas superfícies que durante o contacto mecânico se separam e actuam como um terceiro corpo abrasivo, contribuindo negativamente para um desempenho tribológico aceitável.

Dos resultados laboratoriais foi possível concluir que, tanto o Mo como o TiAlN são dois revestimentos com grande potencial para resolverem o problema da transferência de estanho. Como o filme de TiAlN foi o único em que não se verificou ancoragem de estanho na sua superfície, foi decidido que se avançariam os testes industriais com ferramentas revestidas com este filme.

Os testes em produção revelaram que o comportamento que se obteve em laboratório se manteve no processo, não se verificando transferência de estanho da superfície da FF para a superfície da ferramenta, nas condições de trabalho desenvolvidas no processo de estampagem. No entanto, também se verificou um desgaste prematuro do filme na superfície da ferramenta, tal como tinha acontecido nos testes em laboratório. Para que o revestimento da ferramenta com este filme seja uma solução economicamente viável, terão de ser desenvolvidos estudos com o intuito de melhorar a sua resistência ao desgaste. No entanto, após 90.000 ciclos, o desgaste do revestimento de TiAlN permitiu prever que apenas de 500.000 em 500.000 estampagens seria necessário voltar a revestir o anel da ferramenta, o que traz benefícios significativos, atendendo a que a situação actual obriga a reparações da ferramenta a cada cerca de 15.000 ciclos.

# BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

## 5.1. ARTIGOS EM REVISTAS INTERNACIONAIS



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] P. Oldring and U. Nehring, *Packaging Materials 7, Metal Packaging for Foodstuffs*, ILSI Europe, 2007, ISBN: 90-78637-06-6
- [2] Ö. N. Cora, K. Namiki, and M. Koç, *Wear performance assessment of alternative stamping die materials utilizing a novel test system*, *Wear*, 267 (2009) 1123–1129.
- [3] [EN 10202:2001, Cold reduced tin mill products - Electrolytic tinplate and electrolytic chromium/chromium oxide coated steel, European standard, 2001.](#)
- [4] [https://pt.made-in-china.com/co\\_jswuying/image\\_Prime-Quality-Tin-Plate-Coil-with-2-8-2-8-Coating\\_hioegsueg\\_INBEHmTKhtqp.html](https://pt.made-in-china.com/co_jswuying/image_Prime-Quality-Tin-Plate-Coil-with-2-8-2-8-Coating_hioegsueg_INBEHmTKhtqp.html)
- [5] [M. Barão, Embalagens para produtos alimentícios, Instituto de Tecnologia do Paraná- TECPAR, Agosto 2011.](#)
- [6] <https://www.thebalance.com/metal-profile-tin-2340157>
- [7] P. Soares, *Aços - Características, tratamentos*, Rocha/Artes gráficas, Ida, Outubro de 2009 (6ª edição), ISBN: 9789892017976.
- [8] E. Filho, I. Silva, G. Batalha e S. Button, *Conformação Plástica dos Metais*, Editora da Unicamp, 2011 (6ª edição), ISBN: 978-85-86686-64-1.
- [9] [D. Bianco, Desgaste de Ferramentas de Puncionamento, Porto Alegre \(2003\).](#)
- [10] J. Duarte, A. Rocha e A. Santos, *Tecnologia Mecânica Vol.1 - Corte em ferramenta*, INEGI, Porto (2003), ISBN: 978-97-25922-80-4.
- [11] I. Benazzi e L. Aio, *Tecnologia de estampagem*, São paulo (Julho 2007), DM: 0206007-01
- [12] A. Rocha e J. Duarte, *Tecnologia da embutidura*, Associação Portuguesa das tecnologias de Conformação Plástica, Porto (1992), ISBN: 972-8826-03-6.
- [13] G. Straffelini, G. Bizzotto, V. Zanon, *Improving the wear resistance of tools for stamping*, *Wear* 269 (9–10) (2010) 693–697, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.07.004>
- [14] J.D. Bressan, G.A. Battiston, R. Gerbasi, D.P. Daros, L.M. Gilapa, *Wear on tool steel AISI M2, D6 and 52100 coated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by the MOCVD process*, *J. Mater. Process. Technol.* 179 (1–3) (2006) 81–86, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.070>.
- [15] E.E. Vera, M. Vite, R. Lewis, E.A. Gallardo, J.R. Laguna-Camacho, *A study of the wear performance of TiN, CrN and WC/C coatings on different steel substrates*, *Wear* 271 (9–10) (2011) 2116–2124, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.061>.
- [16] F. Clarysse, W. Lauwerens, M. Vermeulen, *Tribological properties of PVD tool coatings in forming operations of steel sheet*, *Wear* 264 (5–6) (2008) 400–404, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.08.031>.
- [17] A. Ghiotti, S. Bruschi, *Tribological behaviour of DLC coatings for sheet metal forming tools*, *Wear* 271 (9–10) (2011) 2454–2458, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.043>.
- [18] E. Salgueiredo, F.A. Almeida, M. Amaral, M.A. Neto, F.J. Oliveira, R.F. Silva, *A multilayer approach for*

- enhancing the erosive wear resistance of CVD diamond coatings, *Wear* 297(1-2) (2013) 1064-1073, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.051>.
- [19] X.T. Zeng, S. Zhang, T. Muramatsu, Comparison of three advanced hard coatings for stamping applications, *Surf. Coat. Technol.* 127 (1) (2000) 38–42, [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00668-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00668-4).
- [20] B. Podgornik, B. Zajec, N. Bay, J. Vizintin, Application of hard coatings for blanking and piercing tools, *Wear* 270 (11–12) (2011) 850–856, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2011.02.013>.
- [21] A. Ghiotti, S. Bruschi, F. Medea, Comparison of tribological and wear performances of AlSi and Zn coatings in hot stamping of boron steel sheets, *Wear* 332–333 (2015) 810–821, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.046>.
- [22] M. Vilaseca, J. Pujante, G. Ramírez, D. Casellas, Investigation into adhesive wear of PVD coated and uncoated hot stamping production tools, *Wear* 308 (1–2) (2013) 148–154, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.07.003>.
- [23] A. Ghiotti, S. Bruschi, F. Medea, A. Hamasaid, Tribological behavior of high thermal conductivity steels for hot stamping tools, *Tribol. Int.* 97 (2016) 412–422, <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.024>.
- [24] F.F. Komarov, V.M. Konstantinov, A.V. Kovalchuk, S.V. Konstantinov, H.A. Tkachenko, The effect of steel substrate pre-hardening on structural, mechanical, and tribological properties of magnetron sputtered TiN and TiAlN coatings, *Wear* 352–353 (2016) 92–101, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.02.007>.
- [25] Ö.N. Cora, A. Agcayaz, K. Namiki, H. Sofuoglu, M. Koç, Die wear in stamping of advanced high strength steels — investigations on the effects of substrate material and hard-coatings, *Tribol. Int.* 52 (2012) 50–60, <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2012.02.016>.
- [26] F. J. Silva, R. P. Martinho, A. P. Baptista, Characterization of laboratory and industrial CrN/CrCN/diamond-like carbon coatings, *Thin Solid Films*, 550 (2014) 278–284, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.11.042>.
- [27] H. Pengfei, J. Bailing, Study on tribological property of CrCN coating based on magnetron sputtering plating technique, *Vacuum*, 85 (11) (2011) 994–998, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2011.02.007>.
- [28] O. Wanstrand, M. Larsson, P. Hedenqvist, Mechanical and tribological evaluation of PVD WC/C coatings, *Surface Coatings Technology*, 111 (2–3) (1999) 247–254, [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00821-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00821-4).
- [29] A. A. Voevodin, J. P. O’Neill, J. S. Zabinski, Tribological performance and tribochemistry of nanocrystalline WC/amorphous diamond-like carbon composites, *Thin Solid Films*, 342 (1–2) (1999) 194–200, [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01456-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01456-4).
- [30] H. Ahn, P. D. Cuong, K. Shin, and K. Lee, Tribological behavior of sputtered boron carbide coatings and the influence of processing gas, *Wear*, 259 (2005) 807–813, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.096>.
- [31] T. Eckardt, K. Bewilogua, G. van der Kolk, T. Hurkmans, T. Trinh and W. Fleischer, Improving tribological properties of sputtered boron carbide coatings by process modifications, *Surface and Coatings Technology*, 126 (2000) 69–75, [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00525-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00525-9).

- [32] P. Larsson, N. Axén and S. Hogmark, Tribofilm formation on boron carbide in sliding wear, *Wear*, 236 (1) (1999) 73-80, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00266-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00266-5).
- [33] J. Wei, X. Zhang, Q. Xue, The tribological properties of ceramic coatings modified by molybdenum films under oil-lubricated conditions, *Thin Solid Films*, 266 (1) (1995) 48-51, [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(95\)06539-3](https://doi.org/10.1016/0040-6090(95)06539-3).
- [34] X. B. Zhao, Z. H. Ye, Microstructure and wear resistance of molybdenum based amorphous nanocrystalline alloy coating fabricated by atmospheric plasma spraying, *Surface Coatings Technology*, 228 (2013) 266-270, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.05.127>.
- [35] L. Tomaszewski, W. Gulbiński, A. Urbanowicz, T. Suszko, A. Lewandowski, W. Gulbiński, TiAlN based wear resistant coatings modified by molybdenum addition, *Vacuum*, 121 (2015) 223-229, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.08.027>.
- [36] L. Ipaz, J.C. Caicedo, J. Esteve, F.J. Espinoza, G. Zambrano, Improvement of mechanical and tribological properties in steel surfaces by using titanium – aluminum/titanium – aluminum nitride multilayered system, *Applied Surface Science*, 258 (8) (2012) 3805-3814, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.12.033>.
- [37] <http://www.semicore.com/what-is-pvd-coating>
- [38] [https://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/SEM.html](https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html)
- [39] <https://www.mee-inc.com/hamm/energy-dispersive-x-ray-spectroscopyeds/>
- [40] M. L. Alves, Reconhecimento da rugosidade em imagens monocromáticas por meio de análise de textura, Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense, Niterói (Outubro 2011).
- [41] M. O. Brandão, Análise do contato de superfícies metálicas rugosas aplicada a válvulas de esfera de bloqueio, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2007).
- [42] J. Coutinho, *Materiais de Construção – Metais e ligas, Ensaios Mecânicos*, 2005, <https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/8-05%20dureza.pdf>.
- [43] VDI Beschichten von Werkzeugen der Kaltmassivumformung CVD- und PVD-Verfahre, Dusseldorf, 1991.
- [44] V. Nunes, F.G. Silva, M.F. Andrade, R. Alexandre, A.M. Baptista, Increasing the lifespan of high-pressure die cast molds subjected to severe wear, *Surface Coatings Technology*, 332 (2017) 319-331, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.05.098>.
- [45] F. Silva, Nanoindentation on Tribological Coatings, in *Applied Nanoindentation in Advanced Materials*, John Wiley & Sons, New Jersey ,(2017) 111-113.
- [46] M. Laugier, The development of the scratch test technique for the determination of the adhesion of coatings, *Thin Solids*, 76 (1981) 289-294, [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(81\)90700-8](https://doi.org/10.1016/0040-6090(81)90700-8).
- [47] Manual de Qualidade Colep, 2004.
- [48] P. Soares, Aços para ferramentas – Características, Tratamentos, Aplicações, A Fábrica das Letras, Outubro 2008.
- [49] Ficha técnica do aço nº 1.2379, F. Ramada, Julho 2006.

- [50] NP EN 10002-1, Materiais Metálicos, Ensaio de tracção. Parte 1: Método de ensaio, Instituto Português da Qualidade, 2006.
- [51] R. Heidersbach, *Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production*. Singapore: John Wiley & Sons, 2010.
- [52] V. S. Ananthan and E. O. Hall, Macroscopic aspects of Lüders band deformation in mild steel, *Acta Metallurgica et Materialia*, 39 (12) (1991) 3153–3160, [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(91\)90049-7](https://doi.org/10.1016/0956-7151(91)90049-7).
- [53] V. S. Ananthan and E. O. Hall, Shear and kink angles at the Lüders band front, *Scripta Metallurgica*, 23 (7) (1989) 1075–1078, [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(89\)90302-5](https://doi.org/10.1016/0036-9748(89)90302-5).
- [54] R. Hutanu, L. Clapham, and R. B. Rogge, Intergranular strain and texture in steel Lüders bands, *Acta Mater.*, 53 (12) (2005) 3517–3524, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.04.008>.
- [55] J. Han, C. Lu, B. Wu, J. Li, H. Li, Y. Lu, Q. Gao, Innovative analysis of Lüders band behaviour in X80 pipeline steel, *Materials Science Engineering: A*, 683 (23) (2017) 123–128, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.008>.
- [56] N. Srinivasan, N. Raghu, B. Venkatraman, Study on Lüders deformation in welded mild steel using infrared thermography and digital image correlation, *Advanced Materials Research*, 585 (2012) 82–86, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.585.82>.
- [57] B. Barisic, T. Pepelnjak, M.D. Math, Predicting of the Lüders' bands in the processing of TH material in computer environment by means of stochastic modeling, *Journal of Materials Processing Technology*, 203 (1–3) (2008) 154–165, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.054>.
- [58] Ficha de Produto MoldLub, TEandM, 2013.
- [59] Ficha de Produto DiExtra, TEandM, 2014.
- [60] ISO 4288:1996, Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method -- Rules and procedures for the assessment of surface texture, International Organization for Standardization, 1996.
- [61] ISO 14577-1:2015, Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 1: Test method, Switzerland: International Organization for Standardization, Geneva, 2015.
- [62] BS EN ISO 20502:2016 standard, Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics). Determination of adhesion of ceramic coatings by scratch testing; The British Standard Institution, 2016. ISBN: 978 0 580 91178 1.
- [63] T. Bakalova, N. Petkov, H. Bahchedzhiev, P. Kejzlar, P. Louda, Comparison of mechanical and tribological properties of TiCN and CrCN coatings deposited by CAD, *Manufacturing Technology*, 16 (5) (2016) 854–858, [https://www.researchgate.net/publication/309394937\\_Comparison\\_of\\_mechanical\\_and\\_tribological\\_properties\\_of\\_TiCN\\_and\\_CrCN\\_coatings\\_deposited\\_by\\_CAD](https://www.researchgate.net/publication/309394937_Comparison_of_mechanical_and_tribological_properties_of_TiCN_and_CrCN_coatings_deposited_by_CAD)
- [64] Y. Ye, Y. Wang, C. Wang, J. Li, Y. Yao, An analysis on tribological performance of CrCN coatings with different carbon contents in seawater, *Tribology International*, 91 (2015) 131–139, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.07.002>.
- [65] W. Tillmann, J. Herper, I. Laemmerhirt, Development and Tribological Investigation of the Coating System Chromium Carbonitride (CrCN) to Different Surface Designs, *Journal of Materials Science and*

- Engineering, 2 (4) (2012) 223–229, <http://www.airitilibrary.com/Publication/alDetailedMesh?docid=19348959-201204-201206190010-201206190010-223-229>.
- [66] B. Warcholinski, A. Gilewicz, Z. Kuklinski, P. Myslinski, Hard CrCN/CrN multilayer coatings for tribological applications, *Surface Coatings Technology*, 204 (14) (2010) 2289–2293, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.12.019>.
- [67] Y. Zhu, K. Yukimura, C. Ding, P. Zhang, Tribological properties of nanostructured and conventional WC-Co coatings deposited by plasma spraying, *Thin Solid Films*, 388 (2001) 277–282, [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)00805-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)00805-7).
- [68] A. A. Gharam, M. J. Lukitsch, M. P. Balogh, A. T. Alpas, High temperature tribological behaviour of carbon based (B<sub>4</sub>C and DLC) coatings in sliding contact with aluminum, *Thin Solid Films*, 519 (5) (2010) 1611–1617, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.07.074>.
- [69] P. Foroughi, Z. Cheng, Understanding the morphological variation in the formation of B<sub>4</sub>C via carbothermal reduction reaction, *Ceramics International*, 42 (14) (2016) 15189–15198, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.126>.
- [70] B. M. Moshtaghioun, D. Gomez-Garcia, A. Dominguez-Rodriguez, R. I. Todd, Grain size dependence of hardness and fracture toughness in pure near fully-dense boron carbide ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, 36 (2–7) (2015) 1829–1834, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.01.017>.
- [71] A. Liu, J. Deng, H. Cui, Y. Chen, J. Zhao, Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 31 (2012) 82–88, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.09.010>.
- [72] M. Ahlgren, H. Blomqvist, Influence of bias variation on residual stress and texture in TiAlN PVD coatings, *Surface Coatings Technology*, 200 (1–4) Special Issue (2005) 157–160, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.078>.
- [73] J. I. Goldstein, D. E. Newbury, J. R. Michael, N. W. M. Ritchie, J. H. J. Scott, and D. C. Joy, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, Springer, e-book, New York, <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>.
- [74] P. Larsson, N. Axén, S. Hogmark, Tribofilm formation on boron carbide in sliding wear, *Wear*, 236 (1–2) (1999) 73–80, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00266-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00266-5).
- [75] D. C. Reigada, R. Prioli, L. G. Jacobsohn, F. L. Freire, Boron carbide films deposited by a magnetron sputter-ion plating process: Film composition and tribological properties, *Diamond and Related Materials*, 9 (3–6) (2000) 489–493, [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(99\)00318-0](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(99)00318-0).
- [76] A. Erdemir, C. Bindal, G. R. Fenske, Formation of ultralow friction surface films on boron carbide, *Applied Physics Letters*, 68 (12) (1996) 1637–1639, <https://doi.org/10.1063/1.115676>.
- [77] T. Suszko, W. Gulbiński, J. Jagielski, Mo<sub>2</sub>N/Cu thin films - the structure, mechanical and tribological properties, *Surf. Coatings Technol.*, 200 (22–23) Special Issue (2006), 6288–6292, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.11.041>.
- [78] Y. Zh Tang u, K. Yukimura, C. Ding, P. Zhang, Tribological properties of nanostructured and conventional WC-Co coatings deposited by plasma spraying, *Thin Solid Films*, 388 (2001) 277–282,

[https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)00805-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)00805-7).

- [79] O. Wanstrand, M. Larsson and P. Hedenqvist, Mechanical and tribological evaluation of PVD WC/C coatings, *Surface and Coatings Technology*, 111 (1999) 247-254, [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00821-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00821-4).
- [80] K. Chauhan, S. Rawal, A review paper on tribological and mechanical properties of ternary nitride based coatings, 14 (2014) 430-437, <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.055>.
- [81] M.A. Al-Bukhaiti, K.A. Al-habat, W. Tillman, F. Hoffmann, T. Sprute, Tribological and mechanical properties of Ti/TiAlN/TiAlCN nanoscale multilayer PVD coatings deposited on AISI H11 hot work tool steel, 318 (2014) 180-190, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.026>.

## 5.1 ARTIGOS EM REVISTAS INTERNACIONAIS

(1) Improving the punch and die wear behavior in Tin coated steel stamping process, Surface and Coatings Technology, International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF 2017), <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.086>

(2) Minimizing the Adhesion Effects in Food Packages Forming by the Use of Advanced Coatings, 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



# ANEXOS

6.1. ANEXO 1 - Perfilometria

6.1. ANEXO 2 – Imagens SEM superfície dos revestimentos

6.2. ANEXO 3 – Imagens SEM e EDS superfície revestimento tribómetro  
bluot

6.3. ANEXO 4 – Resultados perfilometria



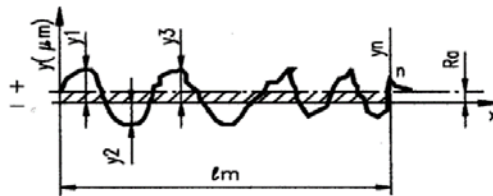
## 6 ANEXOS

### 6.1 ANEXO 1 - Perfilometria

Rugosidade média  $R_a$  – *Roughness Average* é o valor médio aritmético, de todos os desvios do perfil de rugosidade, da linha média dentro do comprimento de medição ( $l_m$ ).

Apesar de ser o parâmetro de análise mais frequente, este apresenta algumas desvantagens. O valor de  $R_a$  indica a rugosidade média num comprimento, por isso se um pico ou vale pronunciado aparecer na superfície este vai ser ‘camuflado’ não alterando muito significativamente o valor médio e, o defeito é ocultado. Foram igualmente analisados os valores da rugosidade média quadrática ( $R_q$ ) e Rugosidade máxima ( $R_{máx}$ ).

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx$$



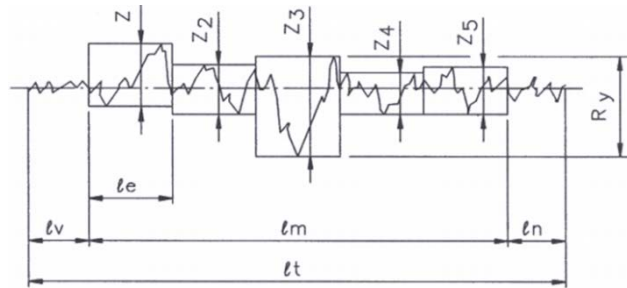
Parâmetro  $R_a$ :  $l_m$  comprimento de medição;  $y(x)$  desvios do perfil de rugosidade [28]

A rugosidade média quadrática  $R_q$  - *Roughness Root Mean* indica o valor médio quadrático de todos os desvios do perfil de rugosidade  $R$  da reta média dentro do comprimento medido ( $l_m$ ).

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} y^2(x) dx}$$

A rugosidade máxima  $R_{máx}$  representa o maior valor de rugosidade medido no conjunto dos cinco comprimentos de medição unitários  $l_e$ , ou seja, a rugosidade

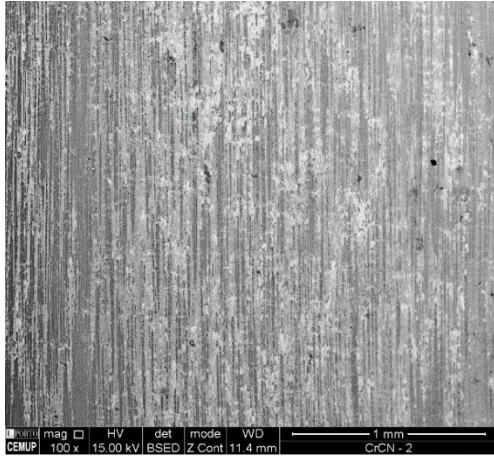
máxima é definida com o maior valor obtido das rugosidades parciais ( $Z_i$ ) nos comprimentos totais de medição ( $l_m$ ). Analisando a Figura 73 é possível verificar que o maior valor parcial é o  $Z_3$ , que está localizado no 3º *cut off* correspondendo à  $R_{máx}$ .



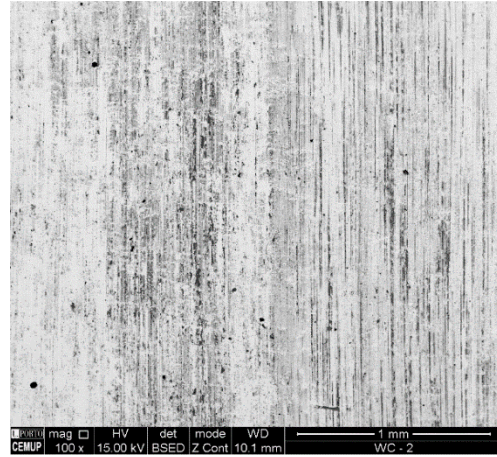
Rugosidade máxima definida pela rugosidade parcial ( $Z_3$ ) [28]

### 6.1 ANEXO 2 – Imagens SEM superfície dos revestimentos

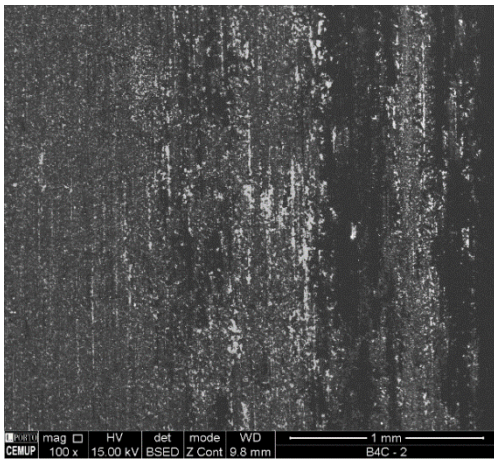
CrCN



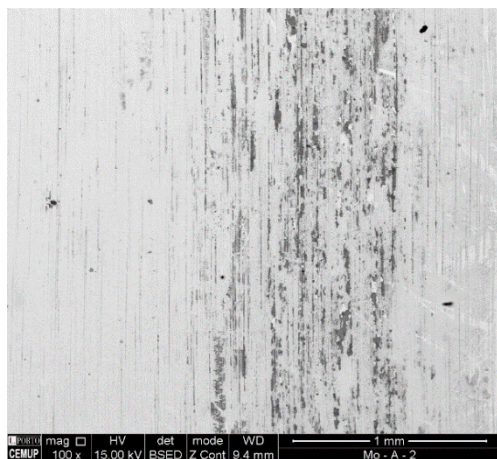
WC



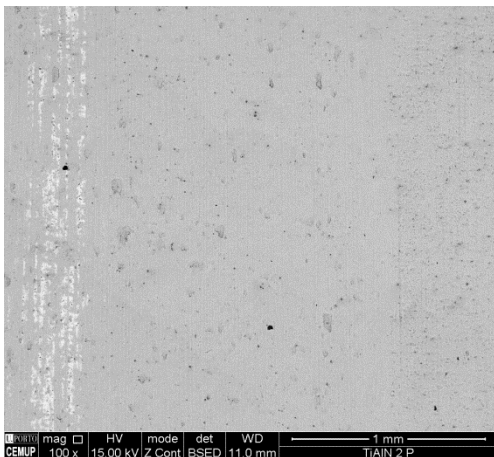
B<sub>4</sub>C



Mo

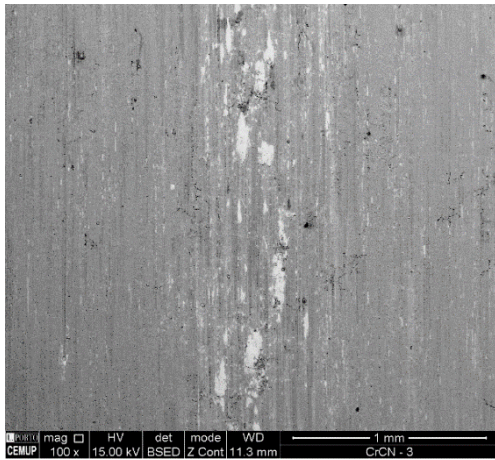


TiAlN

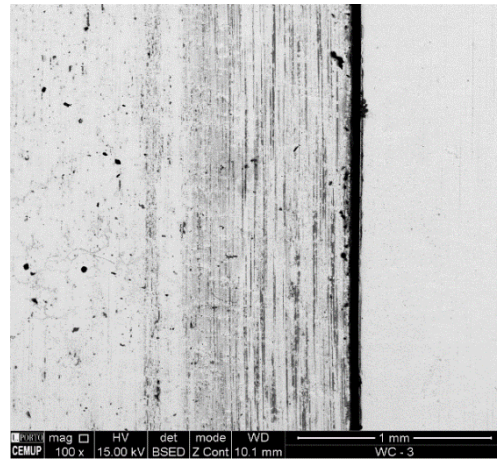


SEM do revestimento na pista após contacto com a FF no ensaio do tribómetro de Blouet – FF Baoshan

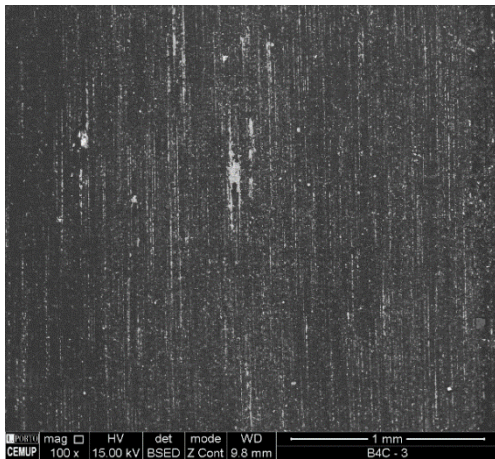
CrCN



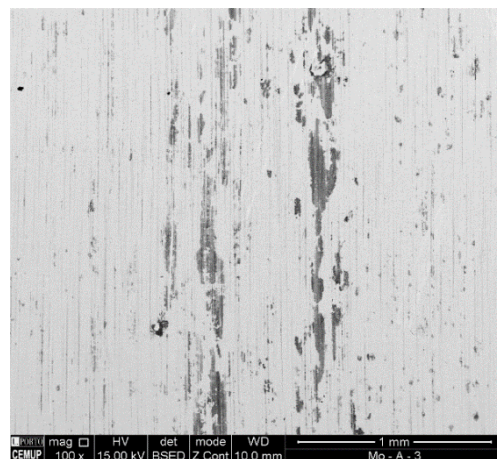
WC



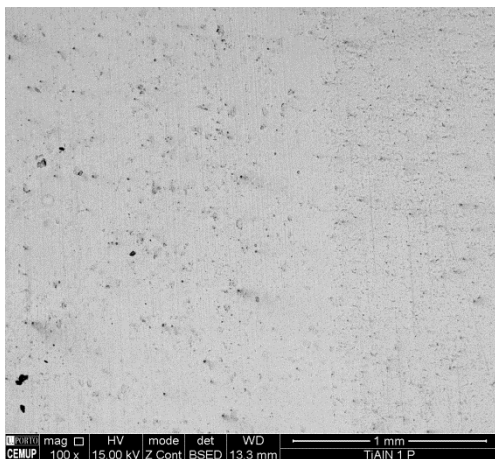
$B_4C$



Mo

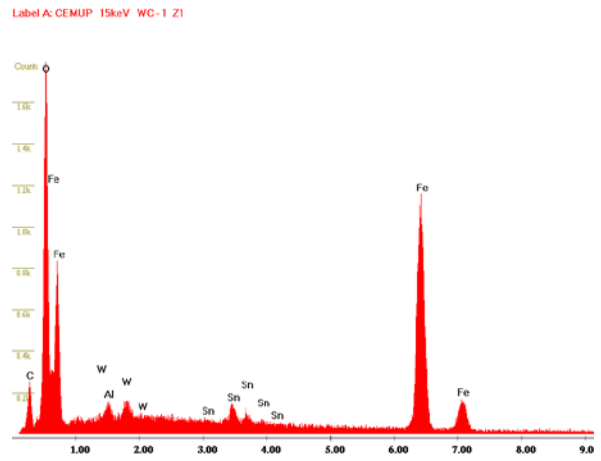
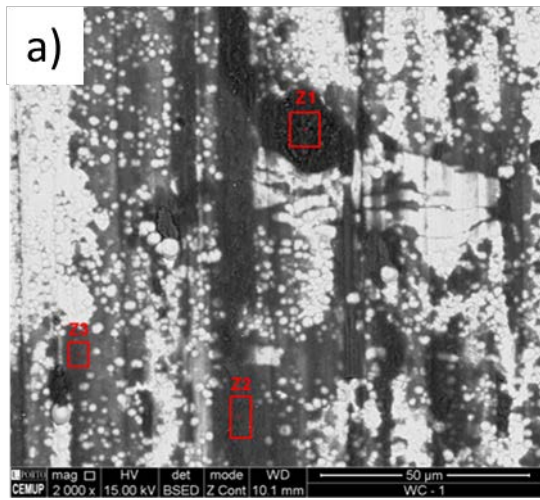


TiAlN

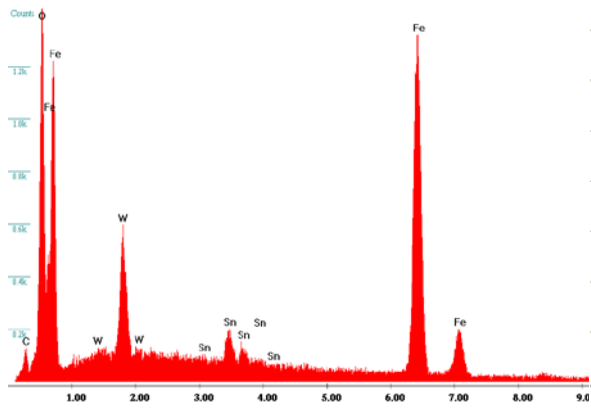


SEM do revestimento na pista após contacto com a FF no ensaio do tribómetro de Blouet – FF Zyposco

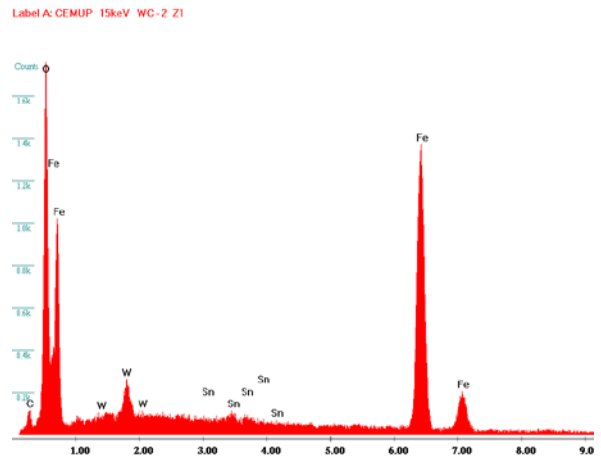
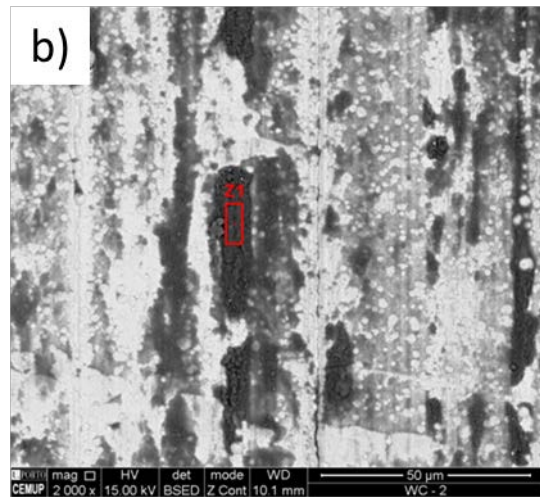
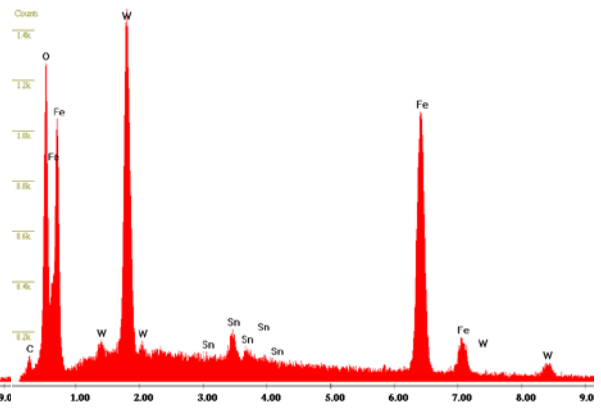




Label A: CEMUP 15keV WC-1 Z2

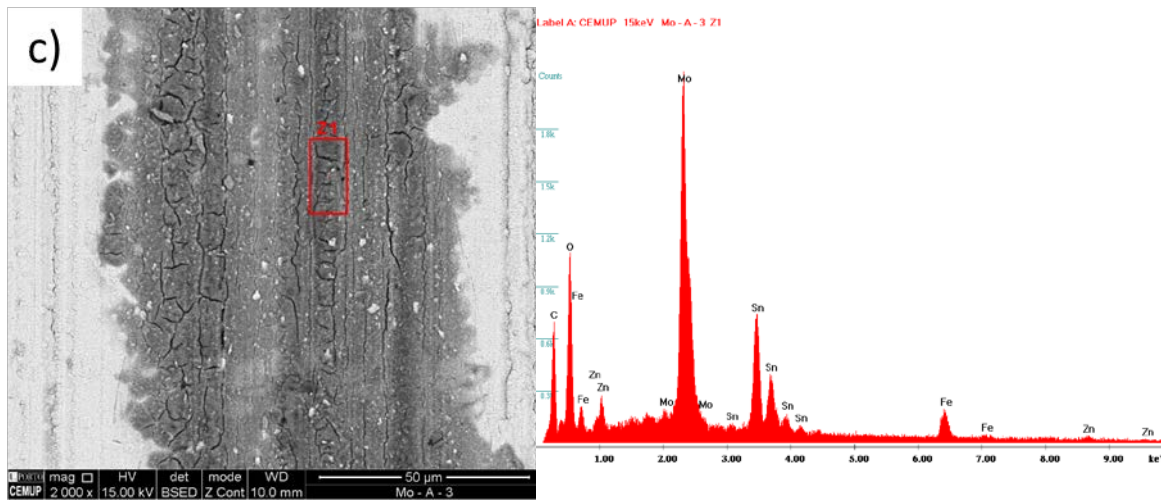


Label A: CEMUP 15keV WC-1 Z3



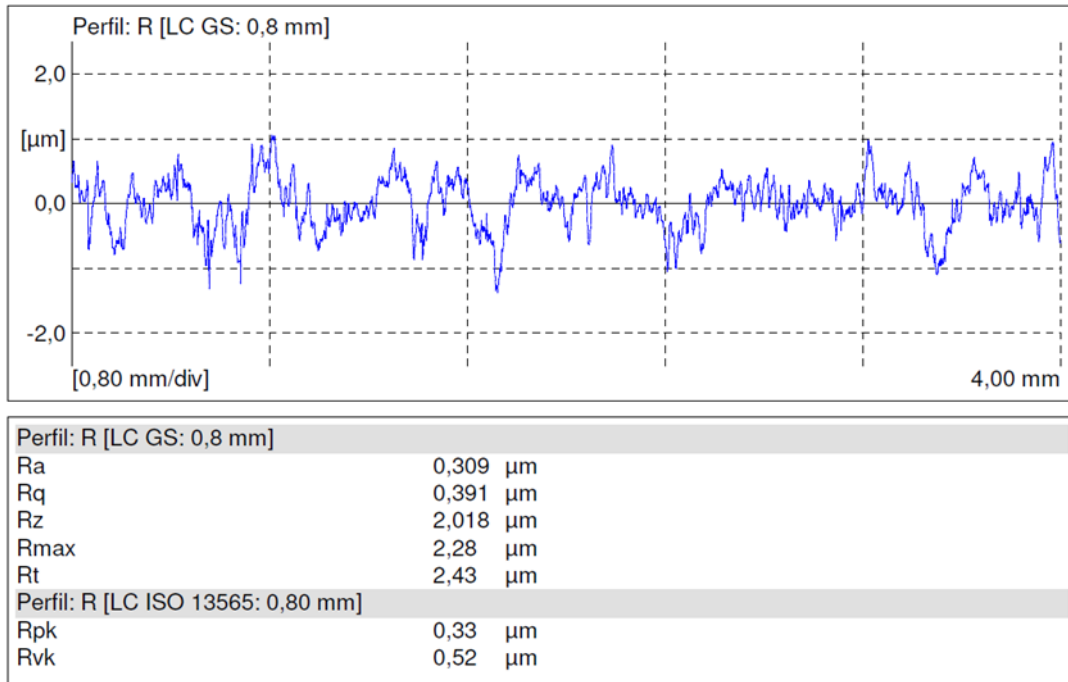




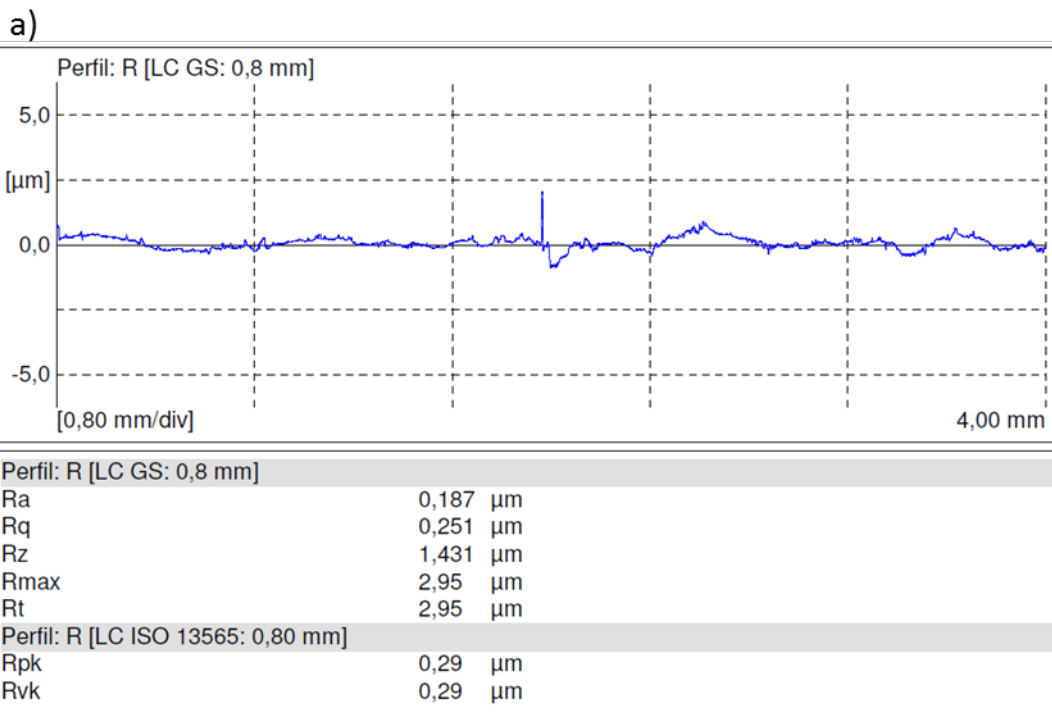


Espectro da deposição de estanho na superfície do revestimento *Mo*: a) Arcelor; b) Baoshan; C) Zyposco

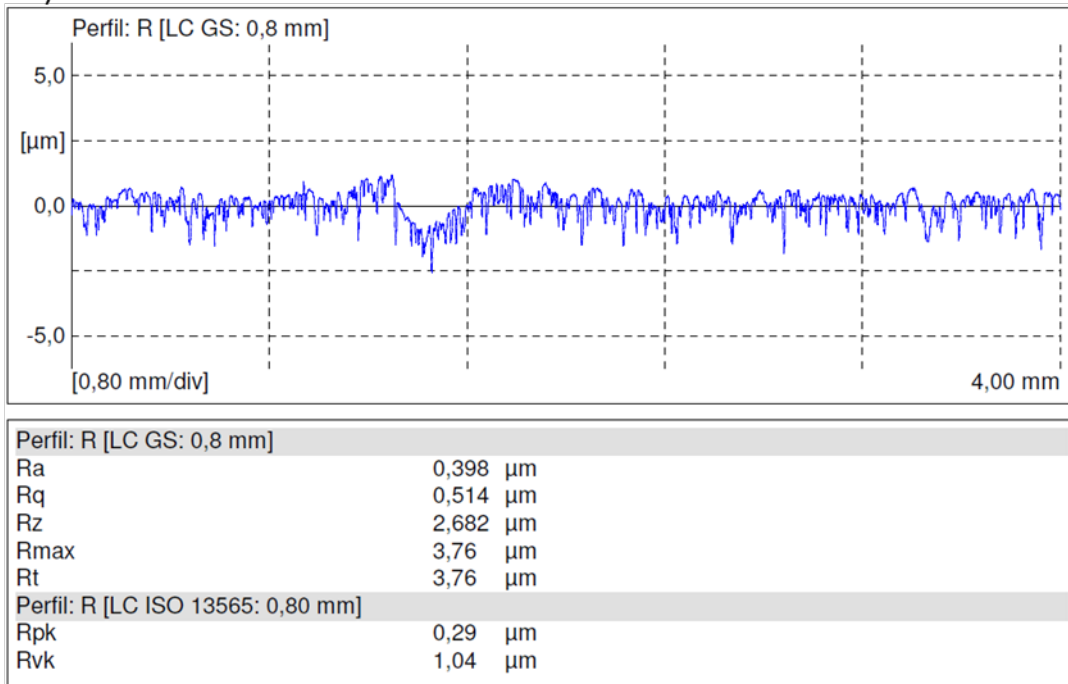
### 6.3 ANEXO 4 – Resultados perfilometria



Perfil de rugosidade obtido por perfilometria da superfície do substrato (Aço 1.2379 retificado)

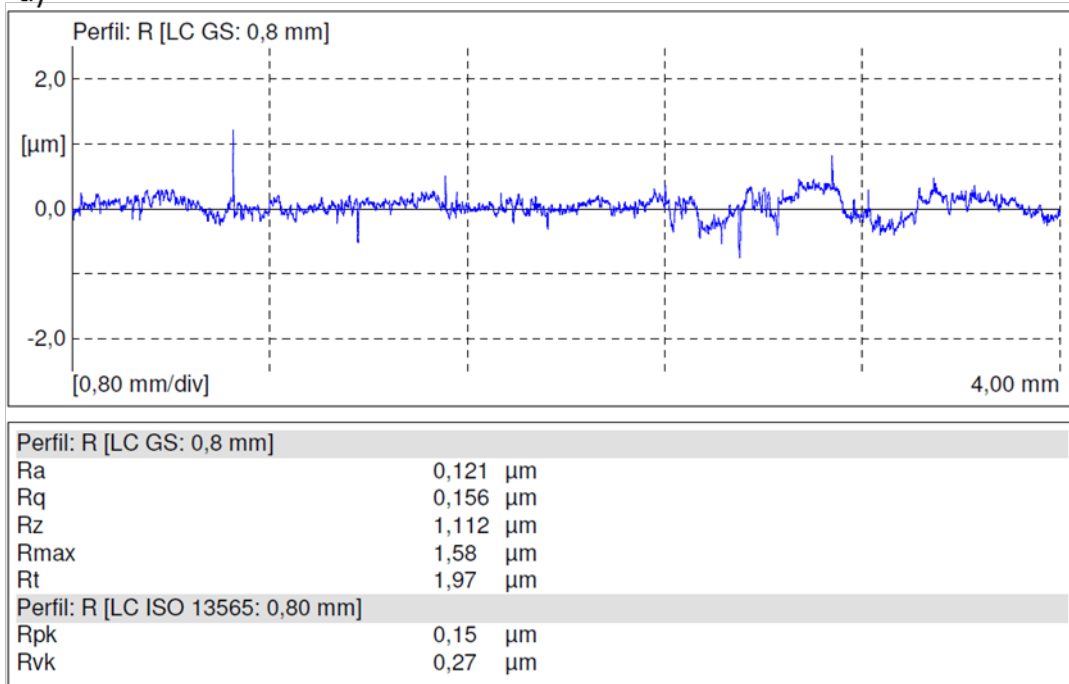


b)

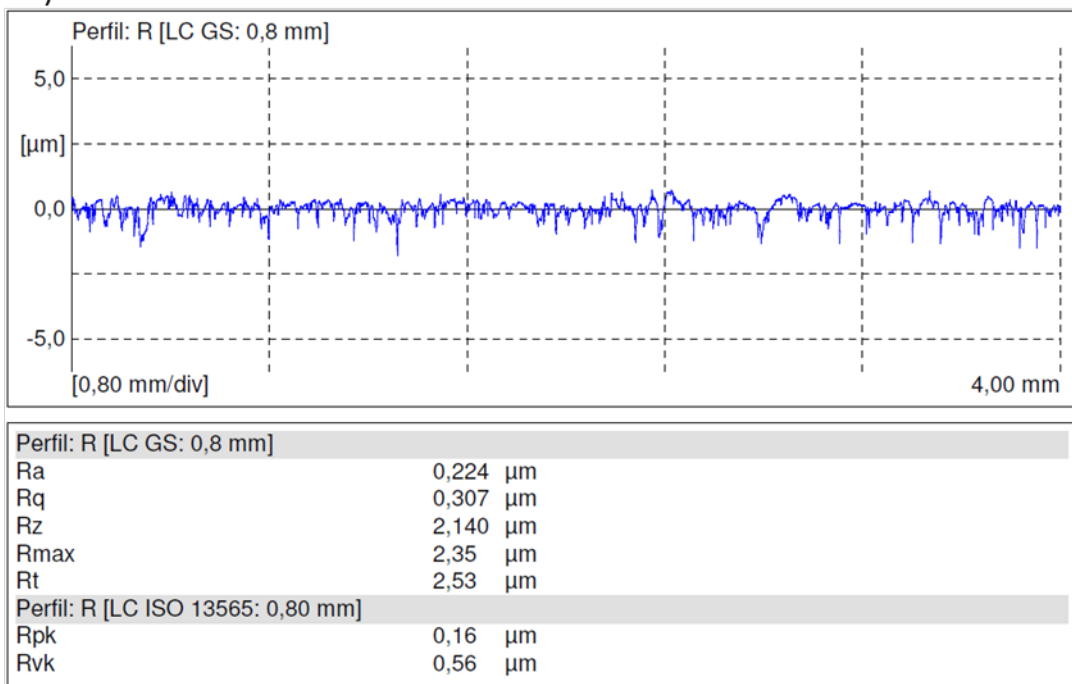


Perfil de rugosidade obtido por perfilometria da superfície do revestimento *CrCN*: a) direcção longitudinal, b) direcção transversal

a)

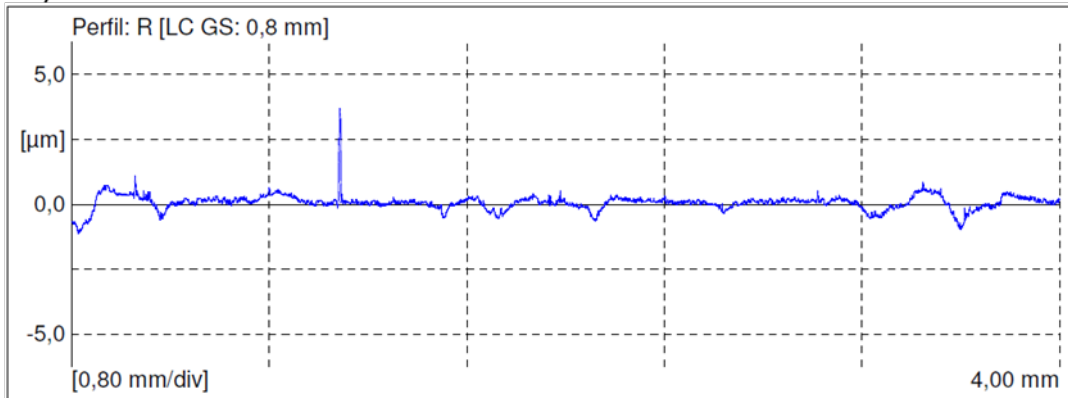


b)



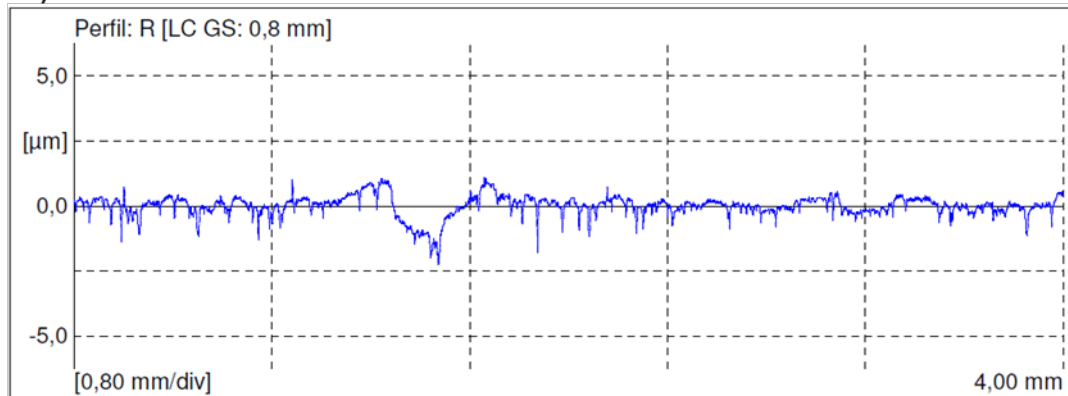
Perfil de rugosidade obtido por perfilometria da superfície do revestimento  $B_4C$ : a) direcção longitudinal, b) direcção transversal

a)



Perfil: R [LC GS: 0,8 mm]	
Ra	0,205 µm
Rq	0,304 µm
Rz	2,057 µm
Rmax	4,21 µm
Rt	4,83 µm
Perfil: R [LC ISO 13565: 0,80 mm]	
Rpk	0,31 µm
Rvk	0,62 µm

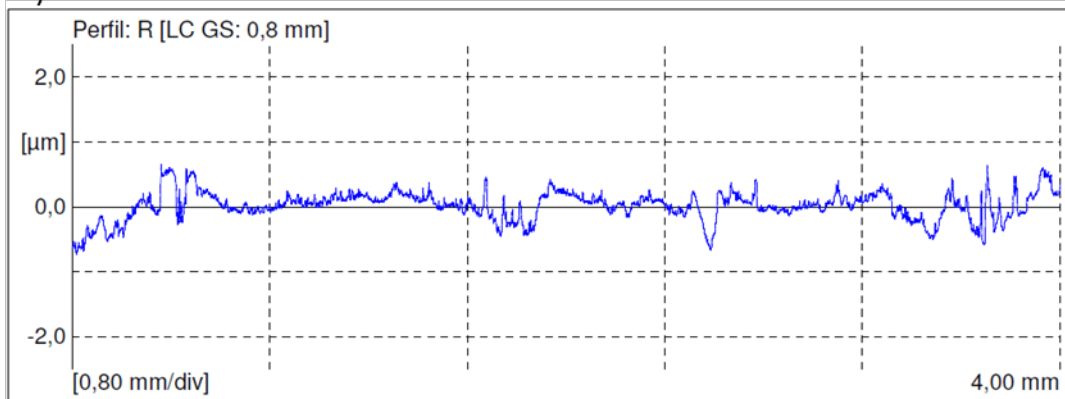
b)



Perfil: R [LC GS: 0,8 mm]	
Ra	0,272 µm
Rq	0,395 µm
Rz	2,293 µm
Rmax	3,30 µm
Rt	3,35 µm
Perfil: R [LC ISO 13565: 0,80 mm]	
Rpk	0,37 µm
Rvk	1,08 µm

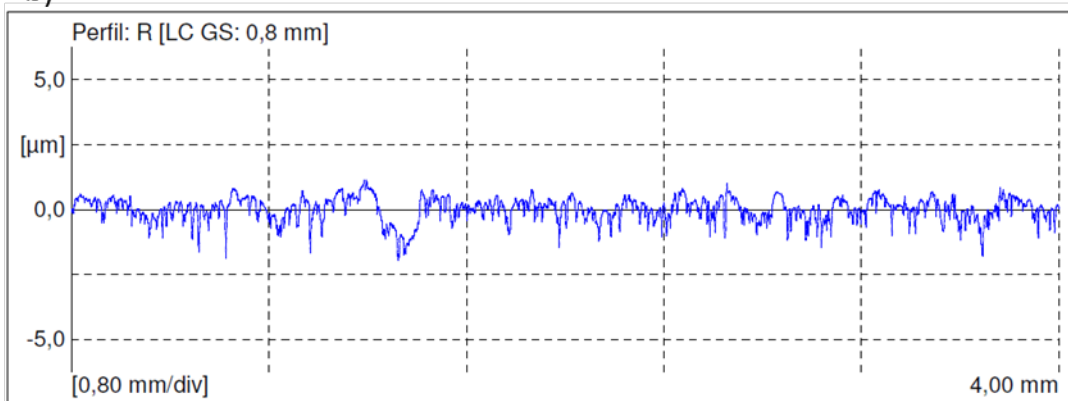
Perfil de rugosidade obtido por perfilometria da superfície do revestimento WC: a) direcção longitudinal, b) direcção transversal

a)



Perfil: R [LC GS: 0,8 mm]	
Ra	0,170 μm
Rq	0,224 μm
Rz	1,023 μm
Rmax	1,39 μm
Rt	1,39 μm
Perfil: R [LC ISO 13565: 0,80 mm]	
Rpk	0,26 μm
Rvk	0,54 μm

b)



Perfil: R [LC GS: 0,8 mm]	
Ra	0,353 μm
Rq	0,455 μm
Rz	2,625 μm
Rmax	3,10 μm
Rt	3,10 μm
Perfil: R [LC ISO 13565: 0,80 mm]	
Rpk	0,21 μm
Rvk	0,81 μm

Perfil de rugosidade obtido por perfilometria da superfície do revestimento *Mo*: a) direção longitudinal, b) direção transversal