

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Jorge Gonzaga de Sousa Medina

**ESTUDO DO EFEITO DA REUTILIZAÇÃO /  
UTILIZAÇÃO DE PÓS RECICLADOS NAS  
CARACTERÍSTICAS DE REVESTIMENTOS OBTIDOS  
POR LASER CLADDING**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na área de Produção e Projeto, orientada pelo Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2019



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Estudo do efeito da reutilização / utilização de pós reciclados nas características de revestimentos obtidos por Laser Cladding**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

## **Study of the effect of the reuse / use of recycled powders on the characteristics of coatings by Laser Cladding**

**Autor**

**Jorge Gonzaga de Sousa Medina**

**Orientadores**

**Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro**

**Engenheiro António Alcântara Gonçalves**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro</b> <b>Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro</b> <b>Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal</b> <b>Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria</b>



**TEandM,**  
**Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A.**

**Coimbra, Julho, 2019**







## **Agradecimentos**

Durante a realização da presente dissertação, pude contar com o apoio e contributo de algumas pessoas, às quais expresso o meu agradecimento.

Em primeiro lugar, à TEandM, em particular ao Engenheiro António Alcântara Gonçalves, pela oportunidade, pela disponibilidade de recursos necessários para a realização deste trabalho e pelo conhecimento que me transmitiu.

Aos colaboradores da TEandM pela ajuda fornecida, em especial ao Engenheiro Francisco Gonçalves.

Ao professor Doutor Altino de Jesus Roque Loureiro, pela disponibilidade e orientação prestada durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais e à minha irmã, que sempre me apoiaram e incentivaram a dar sempre o melhor de mim.

À minha namorada, que sempre me apoiou e nunca me deixou “deitar a toalha ao chão”.

Finalmente, aos meus amigos, por estarem, de algum modo, presentes neste meu percurso.





## Resumo

A eficiência de deposição de material através do Laser Cladding varia tipicamente entre 50 e 80 %, sendo desperdiçadas elevadas quantidades de pós que, ao fim do ano, representam custos significativos.

Esta dissertação, realizada em ambiente industrial, tem como intuito o estudo do efeito da aplicação de pós reciclados em revestimentos obtidos por Laser Cladding. Para tal, foram estudados os dois materiais mais utilizados pela empresa, no ano de 2018: o MetcoClad™ 6, uma superliga de Cobalto, e o MetcoClad™ 52052, uma matriz de Níquel reforçada com Carboneto de Tungstênio.

Este trabalho está dividido em duas partes. A primeira passa pela caracterização dos pós, onde foram analisados a forma, o tamanho e a composição química de pós novos, com uma e duas utilizações. A segunda parte passa pela caracterização de revestimentos obtidos com os pós novos e reutilizados, sendo analisadas a morfologia, a microestrutura, a composição química, a microdureza, a macrodureza e a resistência à abrasão.

Para finalizar, foi elaborada uma análise económica à redução de custos que a empresa pode vir a ter, quando implementar a aplicação de pós reciclados.

Através deste estudo foi possível concluir a viabilidade da reutilização de pós. Para os pós de MetcoClad™ 6, as propriedades mecânicas vão diminuindo com o aumento da reutilização, porém, dependendo da exigência do cliente, estes pós podem ser utilizados. Para os pós de MetcoClad™ 52052, as propriedades mecânicas não sofrem variações significativas ao longo das duas reutilizações.

**Palavras-chave:** Laser Cladding, MetcoClad™ 6, MetcoClad™ 52052, Revestimentos, Reutilização de pós.



## Abstract

The efficiency of deposition of material through Laser Cladding typically ranges from 50 to 80%, because high amounts of powders are wasted which, at the end of the year, represent significant costs.

This dissertation, carried out in an industrial environment, has the purpose of studying the effect of the application of recycled powders on coatings obtained by Laser Cladding. For this purpose, the two materials most used by the company in 2018 were studied: MetcoClad™ 6, a Cobalt superalloy, and MetcoClad™ 52052, a matrix of Nickel reinforced with Tungsten Carbide.

This paper is divided into two parts. The first concerns the characterization of the powders, where the shape, size and chemical composition of new powders with one and two uses were analyzed. The second part discuss the characterization of the coatings obtained with the new and reused powders, being analyzed the morphology, the microstructure, the chemical composition, the microhardness, the macrohardness and the abrasion resistance. Finally, an economic analysis was made to estimate the costs reduction that the company may have by implementing the application of recycled powders.

Through this study, it was possible to conclude the viability of the reuse of powders. For the MetcoClad™ 6 powders, the mechanical properties decrease with increased reuse, however, depending on the customer's requirement, these powders can be used. For MetcoClad™ 52052 powders, the mechanical properties do not undergo significant variations over the two reuses.

**Keywords** Laser Cladding, MetcoClad™ 6, MetcoClad™ 52052, Coatings, Reuse of powders.



## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas .....	xv
Siglas .....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. A EMPRESA.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Tecnologia Laser.....	6
3.2. Tipos de Laser.....	7
3.2.1. Laser de díodos.....	8
3.3. Princípio de funcionamento do Laser Cladding .....	9
3.4. Equipamento Laser da TEandM .....	11
3.5. Materiais .....	11
3.5.1. MetcoClad™ 6 .....	11
3.5.2. MetcoClad™ 52052 .....	12
3.6. Reutilização de pós .....	12
3.6.1. Reutilização de pós de Waspaloy™ .....	12
3.6.2. Reutilização de pós de MetcoClad™ 718 .....	13
4. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS .....	15
4.1. Materiais .....	15
4.1.1. MetcoClad™ 6 .....	15
4.1.2. MetcoClad™ 52052 .....	15
4.1.3. Substrato .....	16
4.2. Procedimentos Experimentais.....	17
4.2.1. Preparação dos Provetes .....	17
4.2.2. Preparação das Amostras.....	17
4.2.3. SEM/EDS e Ataque Químico.....	18
4.2.4. Ensaio Mecânicos .....	18
4.2.5. Processamento dos pós .....	20
4.2.6. Fluorescência de Raios X .....	22
5. CARACTERIZAÇÃO DE PÓS E REVESTIMENTOS.....	23
5.1. Caracterização de pós .....	23
5.1.1. MetcoClad™ 6 .....	23
5.1.2. MetcoClad™ 52052 .....	27
5.2. Caracterização de revestimentos.....	31
5.2.1. Morfologia .....	31
5.2.2. Microestrutura .....	33
5.2.3. Microdureza.....	38
5.2.4. Macrodureza .....	39

5.2.5. Ensaio de abrasão .....	40
6. ANÁLISE ECONÓMICA.....	47
7. CONCLUSÕES.....	51
7.1. Propostas para futuros trabalhos.....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
APÊNDICE A .....	55
APÊNDICE B .....	57
APÊNDICE C .....	63
APÊNDICE D .....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Instalações da empresa TEandM (Adaptado de TEandM - Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A.).	3
Figura 3.1. Esquema sobre absorção, emissão espontânea e emissão estimulada (Adaptado de Melles Griot 2009).	7
Figura 3.2. Esquema da estrutura de um laser de díodos (Adaptado de Melles Griot 2009).	9
Figura 3.3. Revestimento de uma peça através do Laser Cladding.	10
Figura 4.1. Peneiros e plataforma vibratória.	21
Figura 5.1. Microscopia ótica de pós novos de MetcoClad™ 6.	24
Figura 5.2. Microscopia ótica de pós utilizados uma vez de MetcoClad™ 6.	24
Figura 5.3. Microscopia ótica de pós utilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.	25
Figura 5.4. Distribuição granulométrica de MetcoClad™ 6.	26
Figura 5.5. Distribuição de Gauss de MetcoClad™ 6.	26
Figura 5.6. Microscopia ótica de pós novos de MetcoClad™ 52052.	28
Figura 5.7. Microscopia ótica de pós utilizados uma vez de MetcoClad™ 52052.	28
Figura 5.8. Microscopia ótica de pós utilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052.	29
Figura 5.9. Distribuição granulométrica de MetcoClad™ 52052.	30
Figura 5.10. Distribuição de Gauss de MetcoClad™ 52052.	30
Figura 5.11. Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 6.	32
Figura 5.12. Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.	32
Figura 5.13. Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.	32
Figura 5.14. Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 52052.	33
Figura 5.15. Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052.	33
Figura 5.16. Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052.	33
Figura 5.17. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 6.	34
Figura 5.18. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.	34

Figura 5.19. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.....	35
Figura 5.20. Revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 52052: a) Microestrutura; b) Espectro.....	37
Figura 5.21. Revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052: a) Microestrutura; b) Espectro. ....	37
Figura 5.22. Revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052: a) Microestrutura; b) Espectro. ....	37
Figura 5.23. Microdureza de revestimentos obtidos com pós de MetcoClad™ 6. ....	38
Figura 5.24. Microdureza de revestimentos obtidos com pós de MetcoClad™ 52052. ....	39
Figura 5.25. Superfície desgastada de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 6. .	42
Figura 5.26. Mapa de profundidade de desgaste por abrasão de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 6.....	43
Figura 5.27. Superfície desgastada de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6. ....	43
Figura 5.28. Mapa de profundidade de desgaste por abrasão de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6. ....	43
Figura 5.29. Superfície desgastada de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6. ....	43
Figura 5.30. Mapa de profundidade de desgaste por abrasão de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6. ....	44
Figura 5.31. Superfície desgastada de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 52052.....	44
Figura 5.32. Mapa de profundidade de desgaste por abrasão de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 52052.....	45
Figura 5.33. Superfície desgastada de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052. ....	45
Figura 5.34. Mapa de profundidade de desgaste por abrasão de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052. ....	45
Figura 5.35. Superfície desgastada de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052. ....	46
Figura 5.36. Mapa de profundidade de desgaste por abrasão de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052. ....	46
Figura 6.1. Peças antes de revestimento.....	48
Figura 6.2. Peças após revestimento. ....	48
Figura A.1. Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 6.....	55



---

Figura A.2. Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.....	55
Figura A.3. Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.....	55
Figura B.1. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 6..	57
Figura B.2. Espectro da microestrutura no topo do revestimento, com pós novos de MetcoClad™ 6. ....	57
Figura B.3. Espectro da microestrutura a meio do revestimento, com pós novos de MetcoClad™ 6. ....	58
Figura B.4. Espectro da microestrutura junto ao substrato, com pós novos de MetcoClad™ 6.....	58
Figura B.5. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6. ....	59
Figura B.6. Espectro da microestrutura no topo do revestimento, com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.....	59
Figura B.7. Espectro da microestrutura a meio do revestimento, com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.....	60
Figura B.8. Espectro da microestrutura junto ao substrato, com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6. ....	60
Figura B.9. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6. ....	61
Figura B.10. Espectro da microestrutura no topo do revestimento, com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6. ....	61
Figura B.11. Espectro da microestrutura a meio do revestimento, com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.....	62
Figura B.12. Espectro da microestrutura junto ao substrato, com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.....	62
Figura C.1. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 52052.....	63
Figura C.2. Espectro dos carbonetos de tungsténio de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 52052. ....	63
Figura C.3. Espectro da matriz de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 52052.....	64
Figura C.4. Espectro dos fragmentos de carbonetos de tungsténio de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 52052. ....	64
Figura C.5. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052. ....	65
Figura C.6. Espectro dos carbonetos de tungsténio de revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052. ....	65

---

Figura C.7. Espectro da matriz de revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052.....	66
Figura C.8. Espectro dos fragmentos de carbonetos de tungstênio de revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052.....	66
Figura C.9. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052.....	67
Figura C.10. Espectro dos carbonetos de tungstênio de revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052. ....	67
Figura C.11. Espectro da matriz de revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052. ....	68
Figura C.12. Espectro dos fragmentos de carbonetos de tungstênio de revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052. ....	68
Figura D.1. Superfície de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 6.....	69
Figura D.2. Poros em revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.....	70
Figura D.3. Poros em revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.....	70

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Composição química de MetcoClad™ 6 (Adaptado de Oerlikon Metco 2015). .....	15
Tabela 4.2. Composição química de MetcoClad™ 52052 (Adaptado de Oerlikon Metco 2016b).....	16
Tabela 4.3. Composição química do aço C 1 (Adaptado de Ramada Aços, S.A.).....	16
Tabela 4.4. Parâmetros utilizados na realização dos provetes.....	17
Tabela 4.5. Parâmetros utilizados no ensaio de abrasão.....	20
Tabela 5.1. Composição química de pós novos e utilizados uma e duas vezes de MetcoClad™ 6. ....	27
Tabela 5.2. Composição química de pós novos e utilizados uma e duas vezes de MetcoClad™ 52052. ....	31
Tabela 5.3. Macro dureza dois revestimentos realizado com pós novos e reutilizados. ....	40
Tabela 5.4. Resultados dos ensaios de abrasão. ....	41



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Siglas

APS – Atmospheric Plasma Spray

ASTM – American Society for Testing and Materials

BS – British Standard

CVD – Chemical Vapor Deposition

*d* – Média das diagonais

EAWS – Electric Arc Wire Spray

EN – European Standard

*F* – Carga aplicada

*HV* – Microdureza de Vickers

HVOF – High Velocity Oxygen Fuel

IDI – Investigação, Desenvolvimento e Inovação

ISO – International Organization for Standardization

LASER – Light amplification by the stimulated emission of radiation

MO – Microscopia ótica

PVD – Physical Vapor Deposition

SEM/EDS – microscopia eletrónica de varrimento associada a um espectrómetro de raios X de energia dispersiva

TEandM – Tecnologia e Engenharia de Materiais

XRF – Espectrometria de fluorescência de raios X



## 1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação foi realizada no âmbito de um estágio curricular na TEandM – Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A., empresa que se dedica à produção de revestimentos técnicos em componentes para aplicações industriais, recorrendo a diversas técnicas.

No mercado atual, uma empresa competitiva é aquela que consegue realizar o melhor trabalho pelo menor custo. Uma peça, sujeita a ambientes agressivos ou a elevadas solicitações mecânicas, depressa necessita de substituição ou reparação. Uma solução para este problema é fabricar as peças em materiais com melhores propriedades mecânicas, o que em contrapartida eleva bastante os custos de produção.

Surgem assim tecnologias que permitem melhorar a superfície das peças, nomeadamente tecnologias de revestimento. Assim, uma peça pode ser fabricada num material mais económico, por exemplo o aço ao carbono, sendo depois revestida com ligas de metais duros, à base de Cobalto ou Níquel, se se pretende melhorar a sua resistência à abrasão. As peças ficam assim com as propriedades desejadas e com um custo relativamente baixo, quando comparado com a construção total da peça em metais duros.

Contudo, as tecnologias de revestimentos também apresentam desvantagens, como o desperdício de matérias-primas. Esta dissertação tem como objetivo o estudo do efeito da reutilização de pós metálicos em revestimentos obtidos por Laser Cladding. Para este trabalho, serão estudados os materiais mais utilizados pela empresa no ano de 2018, o MetcoClad™ 6 e o MetcoClad™ 52052, e serão feitas duas reutilizações com cada tipo de material.

No capítulo 2 é apresentado um breve resumo da empresa TEandM. No capítulo 3 é realizada uma revisão bibliográfica, onde será abordada a tecnologia laser, os tipos de lasers, focando depois apenas o laser de díodos, visto que é o tipo de laser presente na empresa, o princípio de funcionamento do Laser Cladding, os materiais que serão utilizados e alguns estudos sobre a reutilização de pós.

No capítulo 4 estão descritos os materiais e os procedimentos utilizados durante a realização deste trabalho. No capítulo 5 são caracterizados os pós e os revestimentos, com

pós novos e reutilizados uma e duas vezes. No capítulo 6 está apresentada uma análise económica, nomeadamente a redução de custos para a empresa com a reutilização dos pós. Para concluir, no capítulo 7, estão apresentadas as conclusões e as propostas para futuros temas de investigação.



## 2. A EMPRESA

A TEandM, fundada no ano de 2000, é uma empresa inovadora, que está instalada no Parque Industrial de Taveiro, Coimbra. A atividade principal da empresa consiste na produção de revestimentos técnicos de componentes para aplicações industriais, recorrendo a tecnologias de projeção térmica de alta velocidade (Plasma, HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*), EAWS (*Electric Arc Wire Spray*)), revestimentos físicos em estado de vapor (PVD (*Physical Vapor Deposition*) e PA-CVD (*Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition*)) e Laser Cladding (TEandM - Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A.).

Em 2002, a TEandM certificou-se pelo Bureau Veritas Certification, de acordo com a norma NP EN ISO 9001:2000, sem exclusões, tendo obtido renovação em 2005. Em 2006, através da Bureau Veritas Certification UK, a empresa certificou-se pelas normas de aeronáutica BS EN ISO 9001:2015, EN 9001:2003 e AS9100 Rev. D. Sendo a inovação uma das prioridades da empresa, no ano de 2009 a TEandM certificou-se pela norma de IDI – Investigação, Desenvolvimento e Inovação, NP 4457:2007 (TEandM - Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A.).

As instalações da empresa estão ilustradas na Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Instalações da empresa TEandM (Adaptado de TEandM - Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A.).



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

São diversos os fatores que levam à necessidade de se efetuar revestimentos, quer sejam apenas por aspetos estéticos, como para melhorar as características superficiais das peças. Existem vários tipos de revestimentos, que se dividem em dois grupos, sendo eles classificados em filmes finos (espessuras até 5  $\mu\text{m}$ ) e filmes espessos (espessuras superiores a 5  $\mu\text{m}$ ) (TEandM - Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A.).

Para o caso de filmes finos, têm-se técnicas como o PVD ou o CVD.

O PVD é uma tecnologia de deposição em vácuo, que vaporiza e deposita o revestimento sobre o material que se pretende revestir, obtendo-se um revestimento fino, com espessuras entre 2 e 5  $\mu\text{m}$ . Esta tecnologia é utilizada para revestimentos de ferramentas de corte, sendo utilizados materiais à base de nitretos (Prirev - Surface Technology; Impact Coatings).

O CVD funciona de modo semelhante, sendo que o revestimento resulta de reações entre os gases reagentes e as superfícies dos materiais a revestir. As espessuras dos revestimentos são da mesma ordem do PVD (BOBST).

Para o caso de filmes espessos, tem-se técnicas como APS (*Atmospheric Plasma Spray*), EAWS, HVOF ou Laser Cladding.

O APS é um processo de pulverização de plasma que gera um arco elétrico de elevada potência, fundindo assim a matéria-prima em forma de pó. A pistola de plasma utiliza um ou mais elétrodos, os cátodos, e um bocal, o ânodo, que ioniza os gases envolvidos, formando uma pluma de plasma. Os materiais utilizados, normalmente cerâmicos, são introduzidos na pluma de plasma, onde são fundidos e projetados contra o substrato, formando assim o revestimento. Este processo envolve gases como o hidrogénio, azoto, árgon ou hélio, de forma individual ou em misturas (Oerlikon Metco 2014; Ab 2015).

O HVOF é uma tecnologia que assenta na combustão contínua de uma mistura de oxigénio com um combustível no estado gasoso (acetileno, propano, metano, propileno, hidrogénio) ou no estado líquido (querosene). O pó é injetado, de forma axial, na câmara de combustão, através de um gás inerte, normalmente azoto. A chama e o pó são acelerados através do bocal, podendo atingir velocidades próximas da velocidade do som, e formam o

revestimento. Os materiais utilizados com esta tecnologia são *cermets* (composto formado por metal e cerâmico) (Flame Spray Technologies; Oerlikon Metco 2010).

O EAWS é uma tecnologia de pulverização térmica, que difere das anteriores na medida em que não utiliza gases para a geração da fonte de calor. Dois arames, alimentados continuamente, são carregados eletricamente com polaridades opostas que, quando em contacto, formam um arco elétrico, fundindo assim o material. Estes arames são, normalmente, do mesmo material. O material fundido é projetado contra o substrato, através de um jato de ar de elevada pressão, formando assim o revestimento (Flame Spray Technologies; Oerlikon Metco 2016a).

Devido a este trabalho ser focado no *Laser Cladding*, neste capítulo será elaborada uma revisão bibliográfica detalhada sobre a tecnologia LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), incidindo no princípio de funcionamento, tipos de laser e materiais mais utilizados pela TEandM através esta tecnologia.

### **3.1. Tecnologia Laser**

A tecnologia laser, como o nome indica, significa emissão de luz intensa devido à emissão de radiação estimulada.

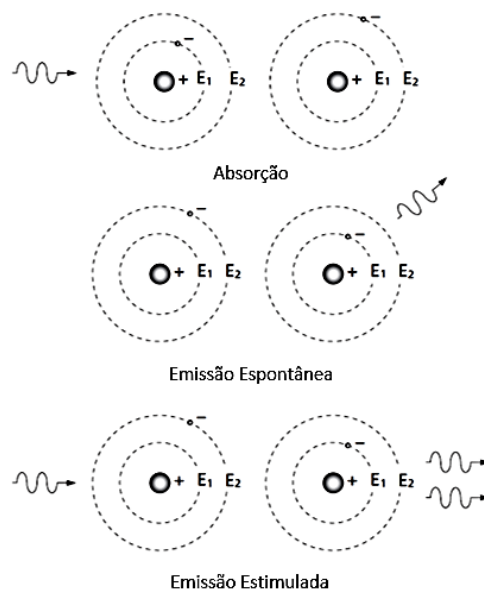
Numa população molecular, as moléculas encontram-se, maioritariamente, no estado fundamental, havendo uma pequena percentagem que se encontra em estados excitados, devido à agitação térmica. Para o funcionamento de um laser, é necessário um mecanismo que bombeie eletrões que se encontram no estado fundamental, para um estado excitado (através da absorção de energia), ou seja, é necessário haver uma inversão de população (Silva 2006).

Em seguida, os átomos voltam para o nível de energia fundamental. Este processo deve-se à perda de energia, através da emissão de fotões. A emissão de fotões pode ocorrer de forma espontânea (quando não há interferência exterior) ou estimulada (quando há passagem de um fóton de energia igual à diferença de energias entre os níveis) (Allemann e Kaufman 2011; Melles Griot 2009; Silva 2006).

A criação do feixe laser é alcançada aquando do regresso dos átomos ao estado fundamental de energia. É conseguido através da emissão estimulada, que é caracterizada

pelo facto de o fóton libertado ter a mesma frequência e fase do fóton responsável pelo estímulo, isto significa que são coerentes e que a soma deles amplifica a intensidade da luz. Assim é possível a obtenção do feixe laser coerente, monocromático, paralelo e intenso (Allemann e Kaufman 2011; Silva 2006).

A Figura 3.1 apresenta um simples esquema sobre absorção, emissão espontânea e emissão estimulada.



**Figura 3.1.** Esquema sobre absorção, emissão espontânea e emissão estimulada (Adaptado de Melles Griot 2009).

## 3.2. Tipos de Laser

Existem vários tipos de laser, podendo ser classificados de diversas formas, tendo como base diferentes parâmetros. No entanto, a forma mais comum de classificar os laser é através do meio ativo onde este é formado. Assim sendo, podem ser divididos nas seguintes categorias (Kannatey-Asibu 2009):

- Laser de estado sólido
- Laser de estado gasoso
- Laser de díodos
- Laser de fibra
- Laser de excímeros

### **3.2.1. Laser de díodos**

Os lasers de díodos, também conhecidos por lasers de semicondutores, são lasers cujo meio ativo para formação do laser é um material semiconductor. São lasers de baixa potência, todavia, quando utilizados em conjunto, atingem potências de 4 kW (Toyserkani et al. 2017).

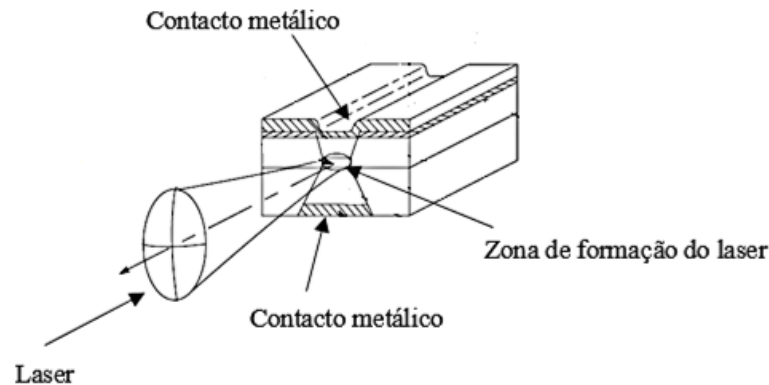
Este tipo de lasers funciona com base na junção entre dois materiais semicondutores do tipo P-N. O material do tipo P é caracterizado pela ausência de elétrons na sua matriz. Esta ausência de elétrons é obtida pela utilização de um dopante do tipo recetor. Os átomos deste elemento dopante apresentam menor número de elétrons de valência do que os átomos que vão substituir no material base. Quando o dopante é adicionado ao material base, o recetor recebe elétrons do semiconductor, ficando este com vazios na sua matriz, originando assim um semiconductor do tipo P. Por outro lado, o material do tipo N é caracterizado pelo excesso de elétrons na sua matriz. Este excesso é provocado pela utilização de um dopante do tipo dador. Os átomos deste dopante apresentam maior número de elétrons de valência do que os átomos que vão substituir no material base. Quando o dopante é adicionado ao material base, o semiconductor recebe elétrons de valência, ficando sobrecarregado, obtendo-se assim um semiconductor do tipo N (Catunda et al. 1998; Melles Griot 2009).

Uma corrente elétrica a passar na junção dos materiais semicondutores, faz com que haja uma combinação entre os elétrons em excesso do semiconductor do tipo N e os vazios do semiconductor do tipo P, havendo emissão de fótons, formando-se assim o feixe laser. Na junção onde se dá a emissão de fótons existem espelhos, cujas funções é redirecionar os fótons contra outros átomos, para que estes emitam também fótons (emissão estimulada), bem como redirecionar a luz para a saída do díodo. Assim, o feixe laser obtido tem baixa divergência, sendo coerente, monocromático e paralelo (Catunda et al. 1998; Melles Griot 2009).

Este tipo de lasers tem como vantagem para a produção de revestimentos serem mais eficientes e com maior foco, quando comparados com os restantes. A potência deste laser é dada pela soma das potências de todos os semicondutores presentes. Quanto maior o número de semicondutores, maior o número de feixes, e maior a potência, que tem como

desvantagem a baixa qualidade do feixe, ou seja, maior a dificuldade de focagem do laser (Toyserkani et al. 2017).

A Figura 3.2 apresenta um esquema da estrutura de um laser de díodos.



**Figura 3.2.** Esquema da estrutura de um laser de díodos (Adaptado de Melles Griot 2009).

### 3.3. Princípio de funcionamento do Laser Cladding

O Laser Cladding é uma tecnologia utilizada para revestimentos de peças de equipamentos industriais, com o objetivo de aumentar a resistência ao desgaste, à corrosão ou à oxidação. Como fonte de calor é utilizado um feixe laser, que funde o material depositado para revestimento e uma pequena fração do material que será revestido, de modo a garantir uma boa ligação metalúrgica entre o revestimento e o substrato.

O material utilizado para revestimento pode ser depositado sob a forma de pó (injetado em simultâneo com o feixe laser ou ser colocado previamente na superfície da peça a revestir) ou de arame, sendo a primeira a mais eficaz e utilizada. A deposição do pó é feita através do bocal de saída do laser, sendo este transportado desde o sistema de alimentação até à saída por um gás inerte, normalmente argon (Borges et al. 2010).

Neste processo é aplicada uma grande quantidade de calor numa área muito limitada, durante um curto período de tempo. Isto significa que não há um aquecimento elevado de toda a peça, o que leva a peça a ter reduzida distorção. A diluição entre o revestimento e o substrato é baixa, resultando em revestimentos com elevado desempenho e com espessura reduzida. As elevadas taxas de aquecimento e arrefecimento deste processo resultam em grãos de estrutura fina e porosidade reduzida (Atamert e Bhadeshia 1989). Para

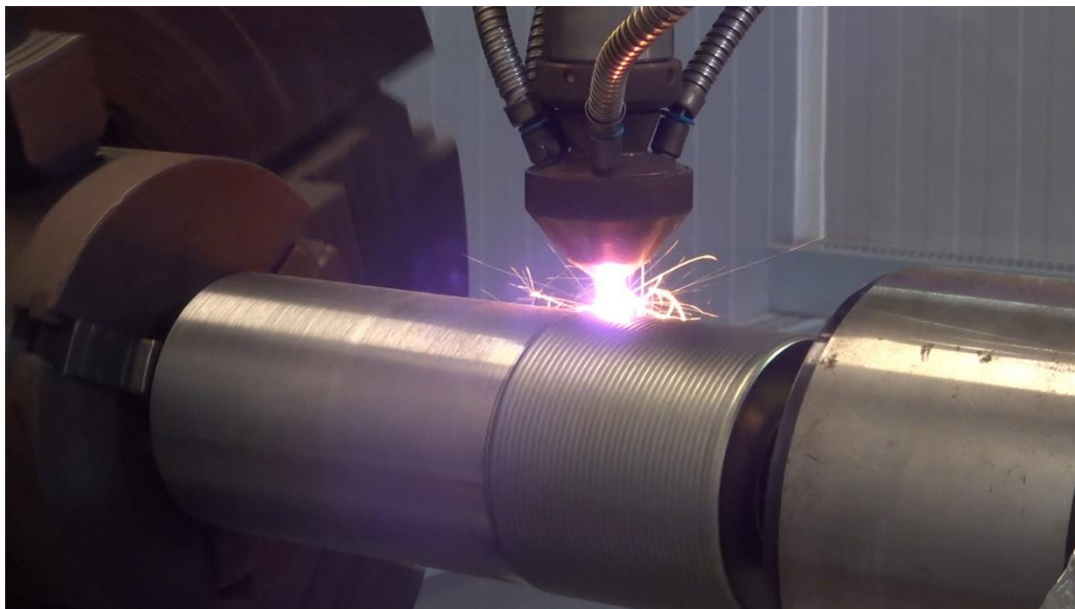
o acabamento superficial de peças obtidas por este processo, há necessidade apenas de uma pequena retificação.

A qualidade do revestimento é influenciada por alguns parâmetros, tais como a potência do laser, a taxa de deposição do material, o diâmetro do *spot* do laser, o ângulo de deposição e a velocidade de processamento.

A forma e a dimensão dos pós também são essenciais para a qualidade do revestimento. Quanto à forma, partículas com forma esférica tem maior fluidez e dão origem a revestimentos homogêneos, quase isentos de poros. Quanto à dimensão, partículas de maior diâmetro tem menor compressibilidade, bem como necessitam de maior energia para as fundir (Hlosta et al. 2016).

Para além de revestimentos, o Laser Cladding pode ser utilizado para fabricação aditiva. O processo de funcionamento é idêntico, adiciona-se camada por camada de material, na forma de pó e utilizando um laser como fonte de calor, porém, na fabricação aditiva, realiza-se a construção da totalidade da peça.

A Figura 3.3 é um exemplo de uma peça a ser revestida por Laser Cladding.



**Figura 3.3.** Revestimento de uma peça através do Laser Cladding.



### 3.4. Equipamento Laser da TEandM

O equipamento Laser presente na TEandM é composto por um robot *ABB IRB*, um equipamento laser, *Laserline LDF*, uma mesa *IRBP* e um torno, bem como um alimentador de pó, *TWIN POWDER FEEDER*, sendo tudo isto controlado através de uma estação de controlo. O laser tem 4 kW de potência e um comprimento de onda entre 980 e 1020 nm. O *spot* do laser varia entre 2 e 7 mm. Este equipamento tem nove eixos, sendo um no torno, dois na mesa e seis no robot. As dimensões máximas que as peças a revestir podem ter são 1 m de diâmetro, tanto para o torno como para a mesa. Para o torno, as peças podem ter até 5 m de comprimento, sendo fixadas em dois pontos, podendo ter até 5 toneladas. Para a mesa, a massa máxima das peças é de 500 kg. Este equipamento tem dois tipos de cabeças: a cabeça de interiores e a cabeça de exteriores. A limitação de diâmetro mínimo é para o caso da cabeça de interiores, sendo este de 60 mm, pois é o diâmetro necessário para que a cabeça entre na peça e tenha espaço para trabalhar. O *nozzle* trabalha a 12 mm da peça. Isto é, os feixes de pó têm uma determinada inclinação em relação ao feixe laser, e é a 12 mm que os feixes se encontram num ponto.

### 3.5. Materiais

Existem vários tipos de materiais que podem ser utilizados para revestimentos, como as superligas de Cobalto, superligas de Níquel e os compósitos de matriz metálica. Nesta dissertação, serão referidos apenas os materiais MetcoClad™ 6 e MetcoClad™ 52052, visto que estes foram os mais utilizados pela empresa durante o ano de 2018.

#### 3.5.1. MetcoClad™ 6

O MetcoClad™ 6, similar à Stellite® 6, é uma superliga à base de Cobalto (Co) e Crómio (Cr), contendo também na sua constituição elementos como Tungsténio (W), Carbono (C), Silício (Si) e Ferro (Fe). Este material é utilizado para o revestimento de componentes para o uso industrial, dando-lhes assim resistência à corrosão, oxidação e desgaste a elevadas temperaturas. Esta liga apresenta elevada resistência à erosão derivada da cavitação. Apresenta também elevada resistência à oxidação, porém um fator limitante desta liga é o fraco desempenho a ácidos fortes, como o ácido clorídrico. Os revestimentos realizados com este material apresentam elevada resistência à oxidação até 1000 °C,

coeficiente de atrito muito baixo e excelente resistência à corrosão, bem como porosidade quase nula e excelentes propriedades anti-gripagem, sendo aplicados em válvulas (Oerlikon Metco 2015).

### **3.5.2. MetcoClad™ 52052**

O MetcoClad™ 52052 é um material compósito de matriz metálica, sendo a matriz maioritariamente composta por Níquel (Ni) e o reforço composto por Carboneto de Tungsténio (WC). A matriz tem como função distribuir os esforços pelo reforço, sendo o Níquel responsável por melhorar a resistência à corrosão. O Carboneto de Tungsténio é responsável por aumentar a dureza e a resistência ao desgaste. Os revestimentos com este tipo de ligas são utilizados em componentes da indústria agrícola, mineira, gás e petróleo (Oerlikon Metco 2016b).

## **3.6. Reutilização de pós**

Foram realizados alguns estudos sobre a reutilização de pós resultantes de deposição por laser. Os materiais estudados foram pós de Waspaloy™, uma superliga à base de níquel, e pós de MetcoClad™ 718, uma superliga também à base de níquel.

### **3.6.1. Reutilização de pós de Waspaloy™**

Um estudo, com mais de uma década, foi realizado com o propósito de se perceber o efeito da reutilização de pós resultantes da fabricação aditiva por laser. Foi utilizado INCONEL 718 como substrato, tendo sido realizadas deposições de pós de Waspaloy™ sobre este, sendo que se efetuaram 10 reutilizações de pós. Para este estudo, foi utilizado um laser de CO<sub>2</sub>. Após a realização de cada reutilização, foi efetuada filtragem e secagem das partículas desperdiçadas. No total, foram realizadas 10 reutilizações, que depois de analisadas, foram encontradas semelhanças e diferenças em relação ao pó virgem, sendo elas (Carroll et al. 2006):

- Pequenas alterações na superfície da estrutura cristalina, bem como na composição, morfologia e textura superficial;
- Fluidez com tendência a aumentar, com o aumento da reutilização;
- Pequena alteração na distribuição de tamanho de partículas;

- O uso de pós reciclados não introduziu quantidades significantes de elementos contaminantes ou causou o surgimento de novas fases;
- Mantém-se a boa ligação metálica entre o revestimento e o substrato;
- Aumento da rugosidade superficial e diminuição da microdureza, conforme o aumento da reutilização.

Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que a reutilização de pós altera as características dos revestimentos, ainda que de forma insignificante, porém deveria ser realizado um estudo mais aprofundado para garantir esta conclusão.

### **3.6.2. Reutilização de pós de MetcoClad™ 718**

Um estudo mais recente foi realizado com o objetivo de caracterização da microestrutura de pó IN718, resultante da fabricação aditiva por laser. Para tal, foram feitas cinco reutilizações dos pós. Após cada utilização, o pó foi recolhido, sendo as frações indesejadas segregadas de forma magnética e os agregados removidos por peneiramento. O material utilizado para substrato foi o aço DIN C45E. Após a realização dos ensaios, obteve-se as seguintes conclusões (Renderos et al. 2017):

- Propriedades morfológicas e químicas mantêm-se após atravessar o bocal;
- Algumas partículas reagem sob influência da fonte de energia, aparecendo óxidos;
- Reduzida quantidade de fases não desejáveis (menos de 2% do pó recolhido), sendo possível a segregação magnética dessas fases do restante pó;
- Composição química do pó reciclado semelhante à matéria-prima;
- Aumento do teor de Nióbio com o aumento das reutilizações, o que limita assim a reutilização deste pó;
- Distribuição do tamanho de pó reciclado centrada num valor médio ligeiramente superior;
- Não se verifica diferenças na composição química ou nas diferentes fases dependendo do número de reutilizações;
- Tensão de rotura diminui acentuadamente com as reutilizações, sendo que não é recomendado mais do que duas reutilizações;

- A remoção de fases indesejáveis permite a melhoria da eficiência final, reduzindo custos e diminuindo a quantidade perigosa de pó.

Com este estudo, conclui-se também que ainda há muito a fazer sobre este assunto, nomeadamente o estudo da reutilização de pós, porém misturados com pós novos.

Esta dissertação vai de encontro a estes dois estudos já realizados, todavia com outros materiais, como o MectoClad™ 6 e o MetcoClad™ 52052, onde o objetivo passa pela redução de custos para a empresa, garantindo qualidade para os clientes.

## 4. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

Neste capítulo estão expostos os materiais e os parâmetros utilizados na realização dos provetes, bem como os procedimentos experimentais necessários para a correta caracterização dos revestimentos e dos pós, para posterior análise e comparação das propriedades mecânicas entre revestimentos com pós novos e pós reutilizados.

### 4.1. Materiais

#### 4.1.1. MetcoClad™ 6

Os pós de MetcoClad™ 6 apresentam forma esférica, sendo a sua densidade de 8,44 g/cm<sup>3</sup>. Os revestimentos obtidos com estes pós apresentam macrodureza entre 36 e 46 HRC e microdureza entre 380 e 490 HV0,1.

A Tabela 4.1 apresenta a composição química dos pós de MetcoClad™ 6.

**Tabela 4.1.** Composição química de MetcoClad™ 6 (Adaptado de Oerlikon Metco 2015).

Material	Composição química (Porcentagem em peso)						
	Co	Cr	W	C	Si	Fe	Outros
MetcoClad™	55,0 –	26,0 –	3,5 –	1,0 –	1,2 –	≤ 3,0	< 1,0
6	64,0	30,0	5,5	1,3	3,0		

#### 4.1.2. MetcoClad™ 52052

Os pós de MetcoClad™ 52052 apresentam também forma esférica, e uma densidade aparente entre 6 e 8 g/cm<sup>3</sup>. Este tipo de pós é composto por uma fase dura, o reforço, de carboneto de tungstênio, e uma fase metálica, a matriz, sendo a relação de matriz/reforço de 40/60 %. A macrodureza da matriz atinge valores entre 37 e 44 HRC. A microdureza dos carbonetos atinge valores de 2700 e 3100 HV0,1.

Na Tabela 4.2 expõe-se a composição química dos pós de MetcoClad™ 52052.

**Tabela 4.2.** Composição química de MetcoClad™ 52052 (Adaptado de Oerlikon Metco 2016b).

Material	Composição química (Percentagem em peso)								
	Reforço (60 %)			Matriz metálica (40 %)					
	W	C	Fe	Ni	Cr	Si	B	Fe	C
MetcoClad™	Balanço	3,8	≤ 0,3	Balanço	6,8 –	3,1 –	1,4 –	1,7 –	0,1 –
52052					8,3	3,9	1,9	3,3	0,4

### 4.1.3. Substrato

A escolha do substrato teve em consideração os materiais mais utilizados em aplicações de revestimentos, nomeadamente os aços. Dentro deste grupo de materiais, os mais utilizados são os aços inoxidáveis austeníticos e os aços ao carbono. Entre estes dois aços, a escolha depende de diversos fatores, sendo os mais importantes o custo e o facto de serem ou não magnéticos. O custo dos materiais é um fator importante, dando-se preferência a um material mais barato. O facto de o material ser ou não magnético também é um fator importante, pois após a aplicação do revestimento, este será retificado, sendo o modo de fixação na retificadora através um prato magnético. Assim, para a realização deste trabalho, será utilizado um aço ao carbono, nomeadamente o aço S235JRC, segundo a norma EN 10025-2, ou vulgarmente conhecido como aço C 1, fornecido pela empresa Ramada Aços, S.A..

A composição química deste aço encontra-se na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3.** Composição química do aço C 1 (Adaptado de Ramada Aços, S.A.).

Material	Composição química (Percentagem em peso)						
	C	Mn	P	S	Cu	N	Fe
Aço C 1	0,200	1,400	0,040	0,040	0,550	0,012	Balanço

## 4.2. Procedimentos Experimentais

### 4.2.1. Preparação dos Provetes

Para a caracterização dos revestimentos, realizaram-se provetes segundo as normas dos respetivos ensaios, neste caso a norma regulamentadora do ensaio de abrasão (ASTM G65), sendo esta a única que especifica as dimensões dos provetes.

Foram cortadas amostras de material base com dimensões 75x25x10 mm, sendo que são necessários três exemplares por cada tipo de material para o ensaio de abrasão, e um quarto exemplar que será utilizado para os ensaios de microdureza e macrodureza. Após o corte do substrato, efetuou-se uma limpeza da superfície, com recurso a uma rebarbadora, de modo a eliminar os óxidos presentes na superfície. Em seguida, realizou-se o revestimento deste substrato, tendo sido empregues os parâmetros mais utilizados pela TEandM para o revestimento de peças, estando estes apresentados na Tabela 4.4.

Após revestimento, os provetes são retificados através de uma mó, de modo a tornar a sua superfície plana e com rugosidade baixa, sendo esta etapa é fundamental para a realização dos ensaios.

**Tabela 4.4.** Parâmetros utilizados na realização dos provetes.

	MetcoClad™ 6	MetcoClad™ 52052
Potência [W]	1900	1000
Velocidade [mm/min]	1000	600
Passo [mm]	2	1,5
Spot [mm]	4,5	6
Gás de transporte (árgon) [l/min]	5	5
Gás de proteção (árgon) [l/min]	6	12
Caudal de pó [g/min]	19	27

### 4.2.2. Preparação das Amostras

Para a realização da análise da microestrutura e do ensaio de microdureza, foi necessário preparar as amostras. Para tal, em primeiro lugar foi realizado um corte da secção transversal dos provetes, com recurso a uma máquina de corte *Buehler Isomet® 4000 Linear Precision Saw*, com uma velocidade de rotação do disco de corte de 4000 rpm e uma velocidade de avanço de 3 mm/min. Em seguida, colocou-se a amostra num molde, ao qual

foi adicionado uma resina, de forma a facilitar o manuseamento e o polimento da amostra. O passo seguinte passou pelo polimento da amostra, em que se utilizou uma máquina polidora *Buehler Alpha 2 Speed Grinder and Polisher + Buehler Vector<sup>®</sup> Power Head*. Foram utilizadas três lixas, P240, P600 e P1200, pela respetiva ordem. A última etapa passou pela realização de um polimento com uma suspensão de alumina, com granulometria de 0,05 µm, de modo a que a superfície da amostra fique espelhada.

#### **4.2.3. SEM/EDS e Ataque Químico**

A microscopia eletrónica de varrimento (SEM) utiliza um feixe de eletrões com uma determinada energia que bombardeia a superfície do material a analisar, obtendo-se assim imagens com elevadas ampliações. Quando o feixe interage com superfície do material, obtém-se um elevado conjunto de informação após processamento, nomeadamente imagens, espectros e mapas de análise química. Quando associada a um espectrómetro de raios X de energia dispersiva (EDS), rapidamente se efetua a caracterização química das regiões observadas, com elevada precisão geométrica. Estes ensaios foram realizados no Instituto Pedro Nunes.

Previamente, é necessário atacar quimicamente a superfície da amostra, para que a microestrutura seja revelada. Para o caso do MetcoClad<sup>TM</sup> 52052, não há necessidade de realizar ataque químico, pois é possível a observação da microestrutura sem o ataque. Para o caso do MetcoClad<sup>TM</sup> 6, foi feito um ataque eletrolítico. Para tal, adicionou-se num recipiente 30 ml de água destilada e 3 g de Persulfato de Amónia. Mergulhou-se a superfície da amostra na mistura, e com uma corrente elétrica de 4-6 V, durante 1-2 s, obtendo-se assim a revelação da microestrutura.

#### **4.2.4. Ensaios Mecânicos**

Para a caracterização dos revestimentos, os provetes foram sujeitos a ensaios de microdureza, macrodureza e desgaste, nomeadamente ensaio de abrasão.

##### **4.2.4.1. Microdureza**

Entende-se por dureza a resistência que o material apresenta à deformação plástica, quando uma carga é aplicada.



Os ensaios de microdureza de Vickers têm como objetivo a avaliação da evolução da dureza com a profundidade. Para tal, o equipamento utilizado foi um microdurómetro *Shimadzu HMV-G21DT*, de acordo com as normas ISO 6507-1:2018 e ASTM E384-17. Este equipamento utiliza um indentador piramidal com base quadrada, cujas faces formam um ângulo de 136°, onde se aplica carga durante um período de tempo, fazendo uma indentação na superfície do material. Para o cálculo da microdureza de Vickers, utiliza-se a expressão (4.1), onde  $F$  é o valor da carga aplicada e  $d$  é a média das diagonais da indentação. Foram utilizadas cargas de 0,1 kg para o MetcoClad™ 6 e 0,3 kg para o MetcoClad™ 52052, durante 15 s. A carga utilizada para MetcoClad™ 52052 é maior pois revestimentos com este tipo de pós apresentam uma microdureza elevada, e com uma carga mais baixa pode não ser visível a indentação. As indentações foram realizadas de 150 em 150 µm.

$$HV = \frac{0,189 * F}{d^2} \quad (4.1)$$

Quanto maior for a dimensão da indentação para a mesma carga, menor será o valor da dureza. Como o revestimento e o substrato são de materiais diferentes, haverá uma zona em que o valor da dureza terá uma variação significativa, sendo esta zona a transição entre o revestimento e o substrato.

#### **4.2.4.2. Macro dureza**

O ensaio de macrodureza de Rockwell consiste em fazer uma indentação no provete, sendo um indentador um cone de diamante ou uma esfera de aço endurecido. O equipamento utilizado neste ensaio foi um macrodurómetro *Indentec Type 8150 LK, Rockwell and Rockwell superficial hardness test*, de acordo com as normas ISO 6508-2 e ASTM E18. Para este tipo de ensaio, os provetes tem que ter a superfície plana e com baixa rugosidade, daí a necessidade de retificação dos revestimentos com uma mó.

Foi utilizada a escala HRC, onde se aplica uma pré carga com 10 kgf, de modo a garantir um contacto firme entre o indentador e o provete, e em seguida aplica-se a carga do ensaio, com 150 kgf.

#### **4.2.4.3. Ensaio de Abrasão**

Uma das formas de ocorrer desgaste é por abrasão. Partículas abrasivas são pressionadas contra a superfície de um provete, movendo-se ao longo desta, provocando

assim libertação de material. O nível deste tipo de desgaste depende de diversos fatores, como o tamanho das partículas, a dureza, a forma, magnitude da força aplicada e a frequência de contacto das partículas abrasivas.

Este ensaio, realizado no instituto Pedro Nunes, normalizado pela norma ASTM G65, permite determinar a taxa de desgaste a que um material está sujeito, quando as partículas duras de um abrasivo se movimentam paralelamente à sua superfície.

É utilizado um abrasivo de sílica, com composições e tamanhos de grão controlados. O abrasivo é introduzido entre o provete e uma roda giratória revestida com borracha, com uma dureza especificada. O provete é pressionado contra a roda, enquanto é inserida uma quantidade controlada e pré-definida de abrasivo. Os parâmetros deste ensaio estão apresentados na Tabela 4.5.

São avaliadas as massas dos provetes antes e depois dos ensaios, sendo a perda de massa a forma de obtenção da taxa de desgaste. Depois, converte-se a massa perdida em volume ( $\text{mm}^3$ ), obtendo-se o resultado do ensaio por esta ordem de grandeza.

**Tabela 4.5.** Parâmetros utilizados no ensaio de abrasão.

Caudal de abrasivo [g/min]	400
Carga aplicada [N]	130
Diâmetro da roda [mm]	216,9
Largura da roda [mm]	13,3
Número de rotações da roda [rpm]	2107

#### **4.2.5. Processamento dos pós**

Por baixo da peça a revestir, foi colocado um tabuleiro de base retangular, com dimensões 1000 x 750 mm. Este tabuleiro continha uma rede, com malha 290 x 250  $\mu\text{m}$ , de modo a eliminar impurezas. Em seguida, foi realizada a separação magnética, utilizando um íman, de forma a eliminar partículas que adquiram propriedades magnéticas, visto que os pós novos de MetcoClad<sup>TM</sup> 6 e MetcoClad<sup>TM</sup> 52052 não são magnéticos.

Com o objetivo de se realizar uma curva granulométrica, foram utilizados peneiros de malha decrescente, com malhas de dimensões 200, 150, 90, 50, 25 e 20  $\mu\text{m}$ , respetivamente, e de acordo com as normas ISO 3310-1 e BS410-1. Estes peneiros estavam

assentes numa plataforma vibratória, *CONTROLS Electromagnetic Sieve Shaker 15-D0407/B*, cuja velocidade rotacional é de 3000 rpm. O equipamento utilizado está apresentado na Figura 4.1.

Colocaram-se as amostras do pó no peneiro superior, e em seguida pôs-se a máquina a vibrar, durante um determinado tempo, não podendo este ser muito baixo (má peneiração), nem muito elevado (quebra das partículas). Por fim, retiraram-se os peneiros e avaliou-se a massa de pó que fica em cada um, obtendo-se assim a curva de distribuição granulométrica.

Para complementar a curva granulométrica, realizou-se a curva de distribuição normal. Para tal, através do microscópio ótico, *Zeiss Axio Scope.A1*, mediu-se, de forma aleatória, um determinado número de partículas das amostras, sendo utilizada uma ampliação de 200x.

Foram utilizadas três amostras com 190 g para a realização da curva granulométrica e, posteriormente, mediram-se ao microscópio cinquenta partículas destas amostras, para se traçar as curvas de Gauss.



**Figura 4.1.** Peneiros e plataforma vibratória.

#### **4.2.6. Fluorescência de Raios X**

A espectrometria de fluorescência de raios X (XRF) é uma técnica analítica utilizada para determinação da composição química em todo o tipo de amostras, sendo estas no estado sólido, líquido ou pós. É um método rápido, exato e não destrutivo.

Os elementos a analisar vão desde o Flúor até ao Urânio (número atômico 9 até 92), sendo que elementos com maior número atômico apresentam melhores níveis de detecção do que os elementos com menor número atômico. Estes ensaios foram realizados no Instituto Pedro Nunes.

Para a realização deste ensaio, foi utilizado o equipamento *PANalytical AXIOS-Advanced WDXRF*, com comprimento de onda dispersivo, onde se analisou uma amostra, de cada tipo de material, com cerca de 18 g, em atmosfera de hélio. Este equipamento está equipado com um espectrómetro com alvos de ródio, fontes de raios-X SST-Max, com saída de 4 kW e que pode ser operado a 160 mA.

## 5. CARACTERIZAÇÃO DE PÓS E REVESTIMENTOS

Por uma questão de simplificação e coerência, todos os gráficos apresentados neste capítulo terão cores diferentes, para os diversos materiais. Assim, a azul, serão apresentadas as curvas com pós novos, a laranja as curvas com pós com uma utilização e a roxo as curvas com pós com duas utilizações de MetcoClad™ 6. A verde, as curvas com pós novos, a amarelo as curvas com pós com uma utilização e a cinzento as curvas com pós com duas utilizações de MetcoClad™ 52052.

### 5.1. Caracterização de pós

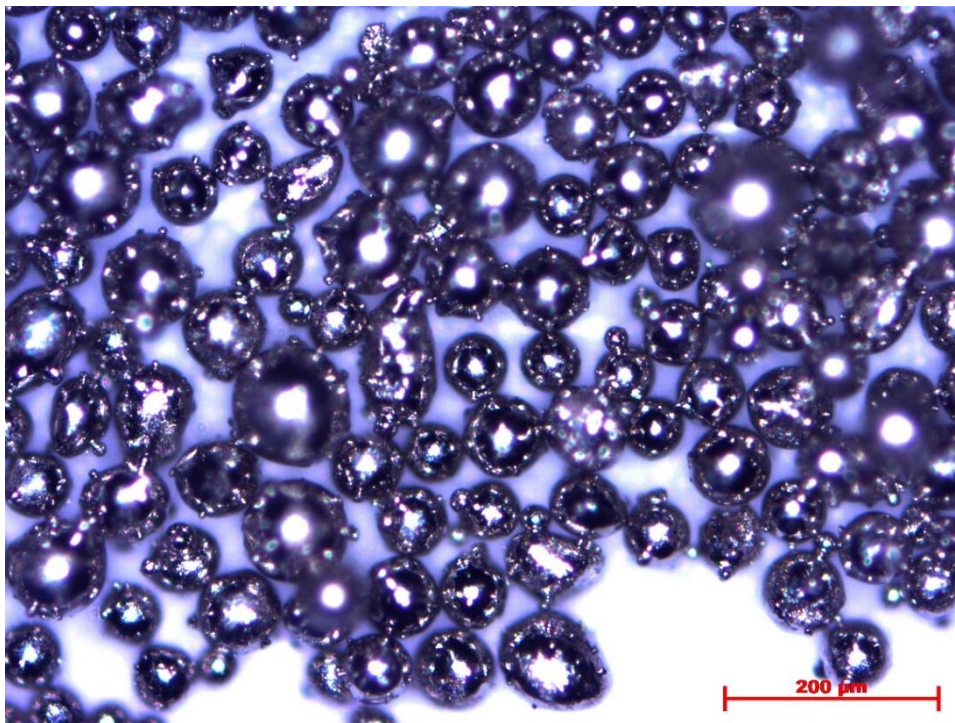
#### 5.1.1. MetcoClad™ 6

##### 5.1.1.1. Forma das partículas

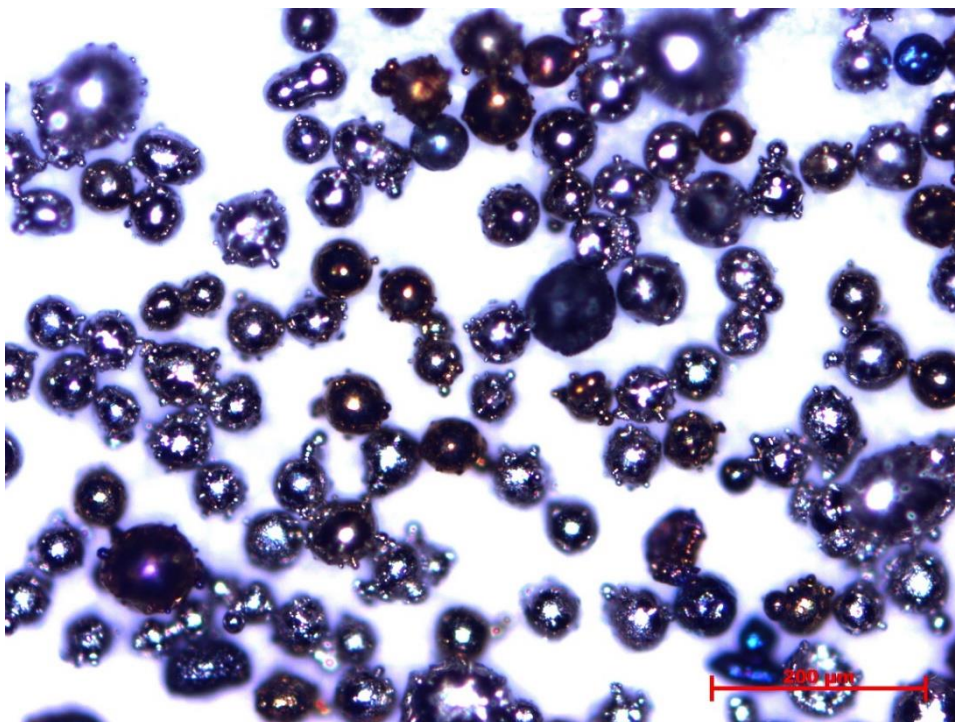
As partículas de MetcoClad™ 6, tal como indicado pelo fabricante, apresentam forma esférica, podendo existir escassas partículas com forma alongada. Na Figura 5.1 está apresentada uma fotografia em microscopia ótica (MO) deste tipo de pó.

Na Figura 5.2 está apresentada uma fotografia MO de pós utilizados uma vez. Como se pode observar, a grande maioria das partículas apresentam forma esférica, porém surge uma pequena percentagem de partículas com forma alongada, que resultam da aglomeração entre partículas.

Quanto aos pós utilizados duas vezes, apresentado na Figura 5.3, é possível observar um aumento do número de partículas aglomeradas, no entanto a grande maioria mantém-se com a forma esférica.



**Figura 5.1.** Microscopia ótica de pós novos de MetcoClad™ 6.



**Figura 5.2.** Microscopia ótica de pós utilizados uma vez de MetcoClad™ 6.

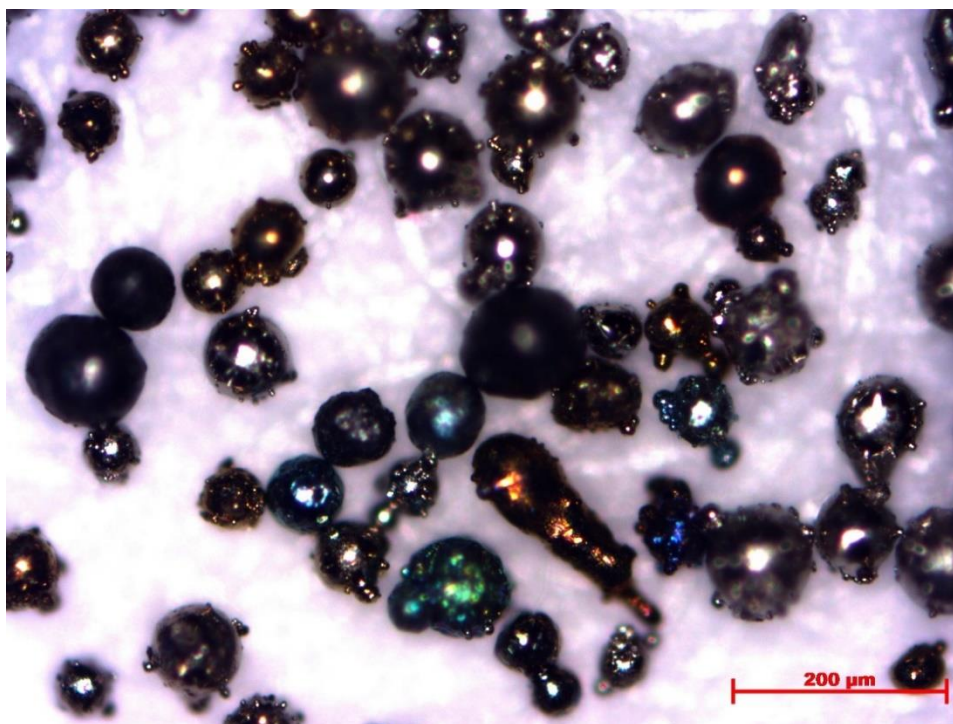


Figura 5.3. Microscopia ótica de pós utilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.

#### 5.1.1.2. Tamanho das partículas

Na Figura 5.4 e Figura 5.5 estão apresentadas as curvas granulométricas e as curvas de Gauss dos pós de MetcoClad™ 6. Como referido no Capítulo 4, os pós foram passados por peneiros com malhas decrescentes.

É possível observar que as curvas dos pós novo e utilizado uma e duas vezes estão praticamente sobrepostas, havendo uma ligeira diferença na percentagem de pó que passa pelo peneiro de granulometria 90  $\mu\text{m}$ , que se considera desprezável.

Assim, a leitura retirada do gráfico é que nenhuma quantidade de pó fica retida no peneiro de malha 150  $\mu\text{m}$ , cerca de 15 % fica retido no peneiro de 90  $\mu\text{m}$ , 83 % fica retido no peneiro de malha 50  $\mu\text{m}$  e os restantes 2 % ficaram retidos no peneiro de malha 25  $\mu\text{m}$ .

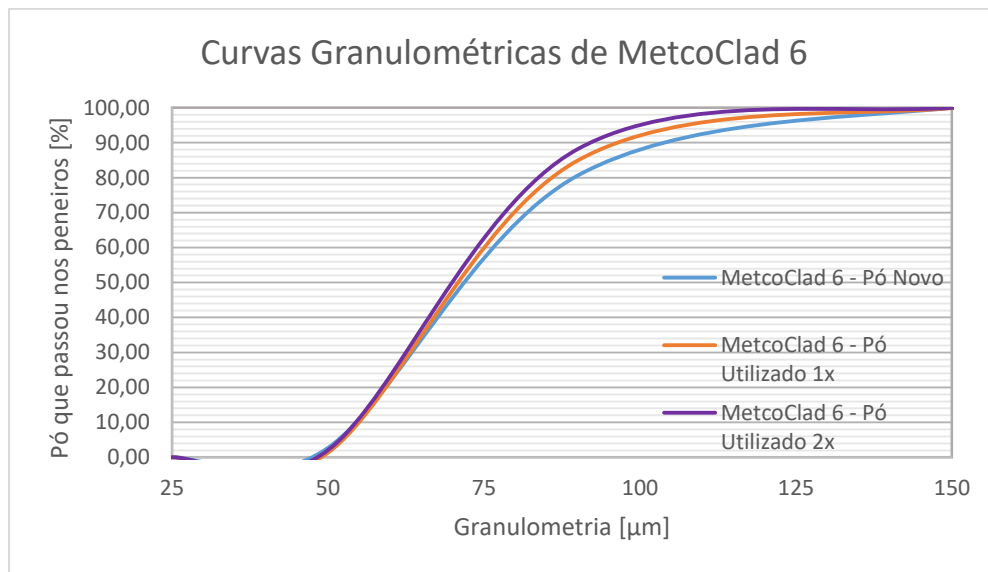


Figura 5.4. Distribuição granulométrica de MetcoClad™ 6.

Através das curvas de distribuição normal, complementa-se as curvas granulométricas. Foram realizadas três análises, onde se mediram, aleatoriamente, cinquenta partículas. Em seguida, realizaram-se três curvas de Gauss, determinando-se o valor médio e o desvio padrão. Por fim, fez-se uma média das médias e dos desvios padrão.

Como se pode ver por estas curvas, as partículas estão maioritariamente concentradas entre 50 e 90  $\mu\text{m}$ , não havendo partículas inferiores a 25  $\mu\text{m}$  nem superiores a 150  $\mu\text{m}$ .

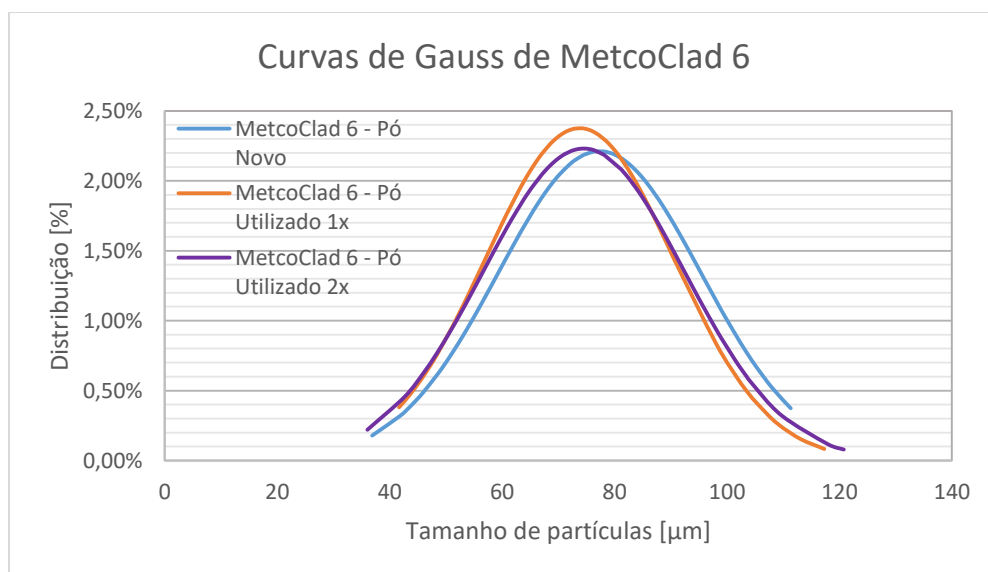


Figura 5.5. Distribuição de Gauss de MetcoClad™ 6.



Não há grandes diferenças em termos granulométricos entre as curvas dos pós novos e utilizados. Para o pó novo, obteve-se o valor médio de 77,3  $\mu\text{m}$  e um desvio padrão de 18,0  $\mu\text{m}$ . Para o pó utilizado uma vez, obteve-se o valor médio de 73,8  $\mu\text{m}$  e um desvio padrão de 16,8  $\mu\text{m}$ . Quanto ao pó utilizado duas vezes, obteve-se um valor médio de 74,5  $\mu\text{m}$  e um desvio padrão de 17,9  $\mu\text{m}$ .

### 5.1.1.3. Análise à composição química

Na Tabela 5.1 estão apresentadas as composições químicas de pós novos e utilizados de MetcoClad™ 6. Como referido no Capítulo 4, a espectrometria de fluorescência de raios X tem a limitação de detetar elementos desde o Flúor até ao Urânio, ou seja, não deteta o Carbono. Então, utilizou-se um valor médio com base nos dados indicados pelo fabricante, ou seja, 1% de Carbono.

**Tabela 5.1.** Composição química de pós novos e utilizados uma e duas vezes de MetcoClad™ 6.

Material	C	Al	Si	Cr	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	W
Novo	1,00	0,03	1,10	27,48	0,16	63,93	1,46	0,07	0,19	4,57
Utilizado 1x	1,00	0,07	1,26	27,14	0,13	63,79	1,70	0,08	0,23	4,60
Utilizado 2x	1,00	0,06	1,58	27,09	0,14	63,26	1,72	0,08	0,23	4,86

Através da tabela, observa-se que não há diferenças significativas nos teores dos elementos, bem como estão coerentes com os valores indicados pelo fabricante.

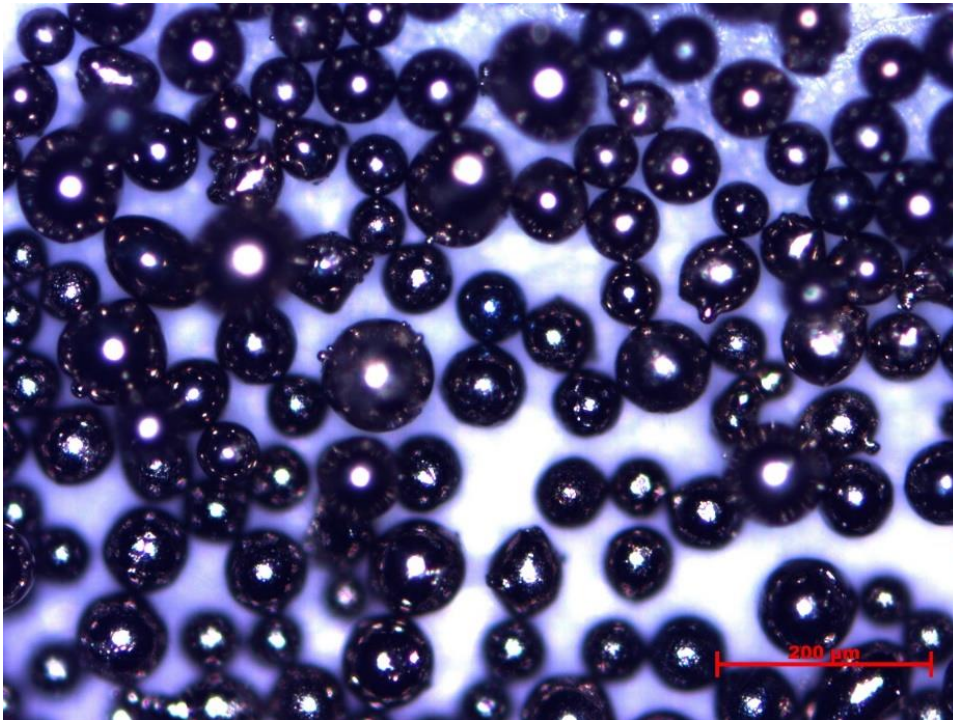
Há também presentes, na composição química, elementos não mencionados pelo fabricante. Isto pode dever-se ao facto de que estes pós foram processados nos mesmos peneiros que os pós de MetcoClad™ 52052, podendo a limpeza não ter sido suficiente para limpar todas as impurezas de MetcoClad™ 52052.

## 5.1.2. MetcoClad™ 52052

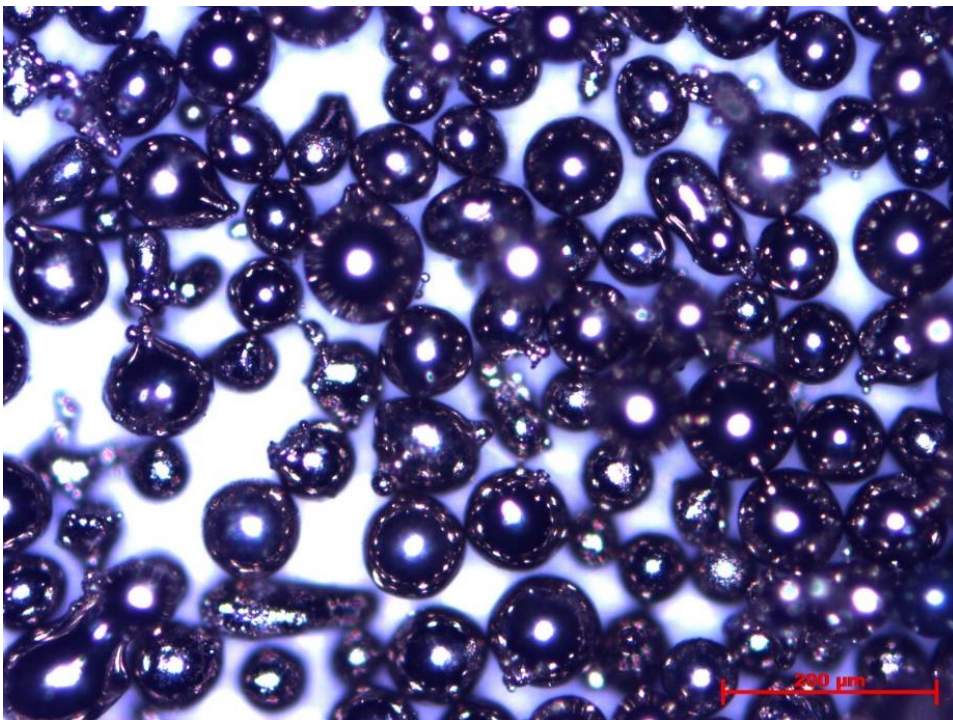
### 5.1.2.1. Forma das partículas

A Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8 apresentam fotografias obtidas com o microscópio ótico, de pós novo e utilizados de MetcoClad™ 52052. A primeira (pós novos), tal como indicado pelo fabricante, apresentam forma esférica. Já nas restantes (pós utilizados

uma e duas vezes), vão surgindo partículas alongadas e aglomerados de partículas com forma irregular, ainda que em pequenas percentagens.



**Figura 5.6.** Microscopia ótica de pós novos de MetcoClad™ 52052.



**Figura 5.7.** Microscopia ótica de pós utilizados uma vez de MetcoClad™ 52052.

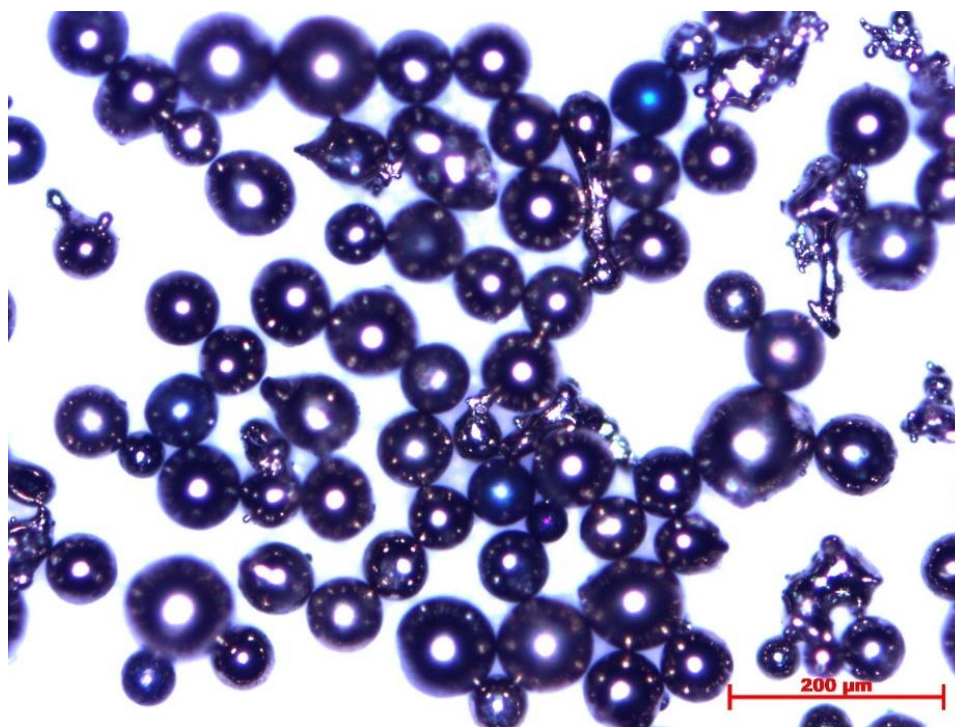


Figura 5.8. Microscopia ótica de pós utilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052.

#### 5.1.2.2. Tamanho das partículas

A Figura 5.9 e a Figura 5.10 apresentam as curvas granulométricas e as curvas de Gauss para os pós novo e utilizado (uma e duas vezes) de MetcoClad™ 52052. O procedimento utilizado foi igual ao utilizado com os pós de MetcoClad™ 6.

Para este caso, as curvas granulométricas estão totalmente sobrepostas. Cerca de 9 % do pó ficou retido no peneiro de 90  $\mu\text{m}$ , 86 % ficou retido no peneiro de malha 50  $\mu\text{m}$  e os restantes 5 % ficaram retidos no peneiro de malha 25  $\mu\text{m}$ , não tendo passado nenhum pó para o peneiro de malha 20  $\mu\text{m}$ .

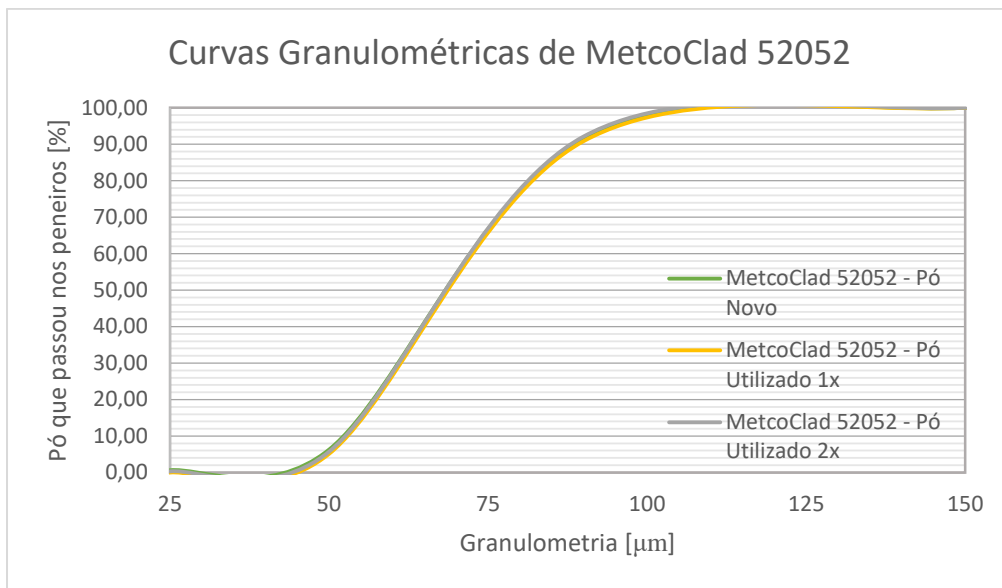


Figura 5.9. Distribuição granulométrica de MetcoClad™ 52052.

As curvas de Gauss complementam as curvas granulométricas, na medida em que se observa a maior concentração de pó entre 50 e 90  $\mu\text{m}$ , não se observa partículas com dimensões inferiores a 25  $\mu\text{m}$  nem superiores a 150  $\mu\text{m}$ .

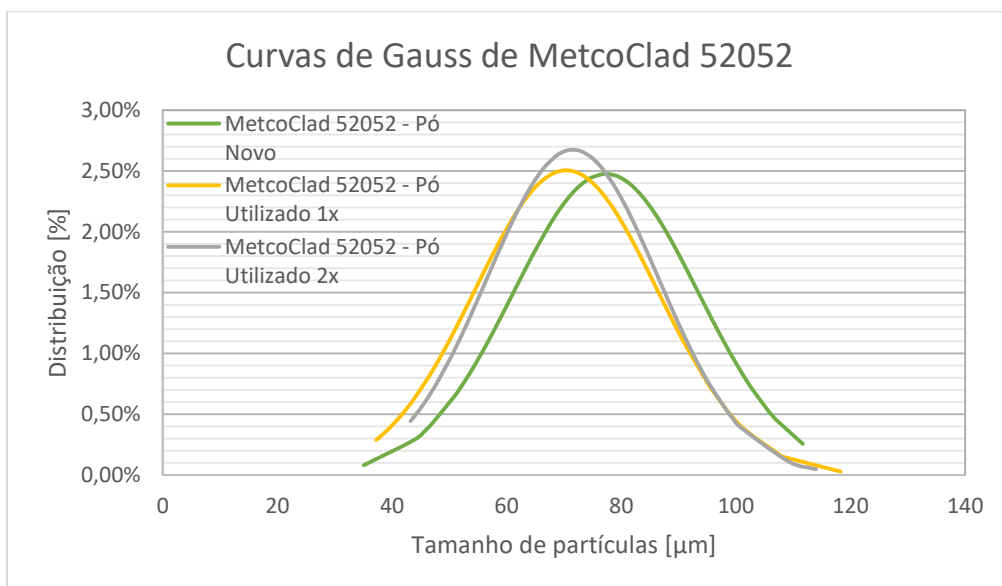


Figura 5.10. Distribuição de Gauss de MetcoClad™ 52052.

Para o pó novo, obteve-se um valor médio de 77,3  $\mu\text{m}$  e um desvio padrão de 16,1  $\mu\text{m}$ . Para o pó utilizado uma vez, obteve-se um valor médio de 70,4  $\mu\text{m}$  e um desvio padrão de 15,9  $\mu\text{m}$ . Para o pó utilizado duas vezes, obteve-se um valor médio de 71,5  $\mu\text{m}$  e

um desvio padrão de 14,9  $\mu\text{m}$ . Entre os pós novos e reutilizados, verifica-se uma diminuição do valor médio, ou seja, um refinamento do pó.

### 5.1.2.3. Análise à composição química

Na Tabela 5.2 está apresentada a composição química dos pós novos e reutilizados de MetcoClad<sup>TM</sup> 52052. Esta análise considera os pós como um todo, não dividindo em matriz e em reforço. Ou seja, os valores são apresentados na percentagem total da amostra. Tal como no anterior, o equipamento, para além de não detetar o Carbono, também não deteta o Boro. Assim, utilizou-se um valor médio de Carbono e de Boro, sendo este valor médio calculado com a contribuição de 60% do reforço e 40% da matriz, ou seja, 3,0% de Carbono e 0,6% de Boro.

**Tabela 5.2.** Composição química de pós novos e utilizados uma e duas vezes de MetcoClad<sup>TM</sup> 52052.

Material	B	C	Al	Si	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	W
Novo	0,60	3,00	0,07	0,91	5,46	1,66	0,03	36,03	0,03	52,23
Utilizado 1x	0,60	3,00	0,06	0,70	4,50	1,38	0,04	27,35	0,02	62,39
Utilizado 2x	0,60	3,00	0,06	0,73	4,73	1,46	0,11	28,82	0,03	60,47

Através da tabela, observa-se que há uma diminuição significativa no teor de Níquel, e aumento do teor de Tungsténio. Quanto aos restantes elementos, não há alterações significativas.

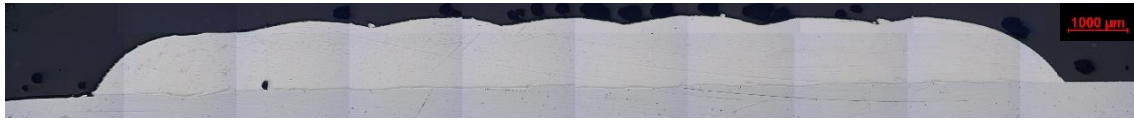
## 5.2. Caracterização de revestimentos

### 5.2.1. Morfologia

Na Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13 estão apresentados os cortes das secções transversais dos revestimentos obtidos com pós novos e reutilizados uma e duas vezes de MetcoClad<sup>TM</sup> 6. É possível a visualização do revestimento e do substrato. Observa-se também a zona da diluição, ainda que baixa, e que não aumenta com o aumento da reutilização dos pós.

Verifica-se que para os revestimentos com pós reutilizados, há um aumento do nível de porosidade, em comparação com revestimentos obtidos com pós novos.

Em termos de espessura antes de retificação, os revestimentos obtidos com os pós novos e reutilizados é de aproximadamente 1,20 mm.



**Figura 5.11.** Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 6.



**Figura 5.12.** Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.



**Figura 5.13.** Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.

Foi aumentada em 100 W a potência do laser, bem como se inclinou a cabeça do *robot* em 20°, de modo a diminuir a porosidade dos revestimentos. Na Figura A.1, Figura A.2 e Figura A.3, do apêndice A estão apresentadas as secções transversais dos revestimentos com pós novos e reutilizados uma e duas vezes e, de facto, há uma diminuição do número de poros. Isto deve-se ao facto de os poros resultarem de gases presentes nos revestimentos. Os gases tendem a libertar-se, devido à diferença de pressões parciais. Quanto maior for a temperatura durante o revestimento, menor a velocidade de arrefecimento, o que permite que os gases se libertem para a atmosfera, reduzindo assim os poros.

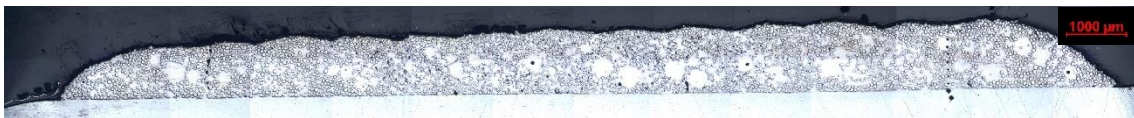
Na Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16 estão apresentados os cortes das secções transversais de revestimentos obtidos com pós novos e reutilizados uma e duas vezes de MetcoClad™ 52052. É possível observar a presença de poros, independentemente dos pós serem novos ou reutilizados. Quanto à diluição, independentemente dos pós serem novos ou reutilizados, não se verifica aumento ou diminuição desta zona, sendo esta quase impercetível.

Com o auxílio de um *software* de análise de imagem, *ImageJ*, foram analisadas as percentagens de matriz e de reforço, e verificou-se que se manteve a proporção de 60 % de reforço e 40 % de matriz, tanto para o revestimento com pós novos como para pós reutilizados.

Tal como os revestimentos obtidos com MetcoClad™ 6, os revestimentos obtidos com pós de MetcoClad™ 52052 apresentam uma espessura, antes de retificação, de cerca de 1,20 mm.



**Figura 5.14.** Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 52052.



**Figura 5.15.** Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052.



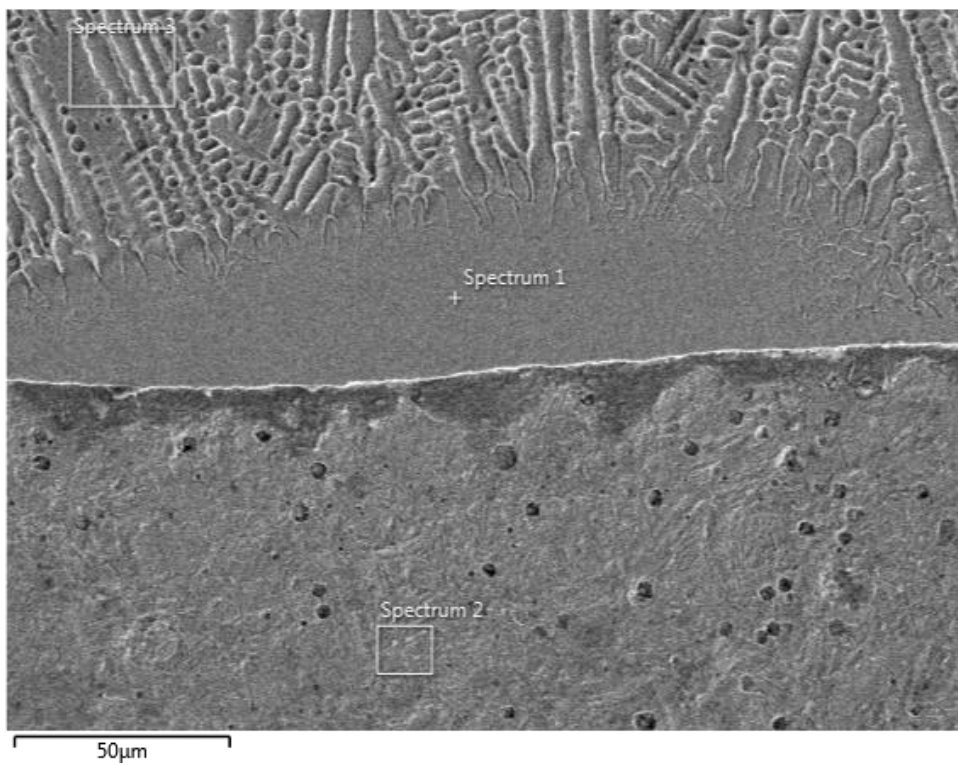
**Figura 5.16.** Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052.

## 5.2.2. Microestrutura

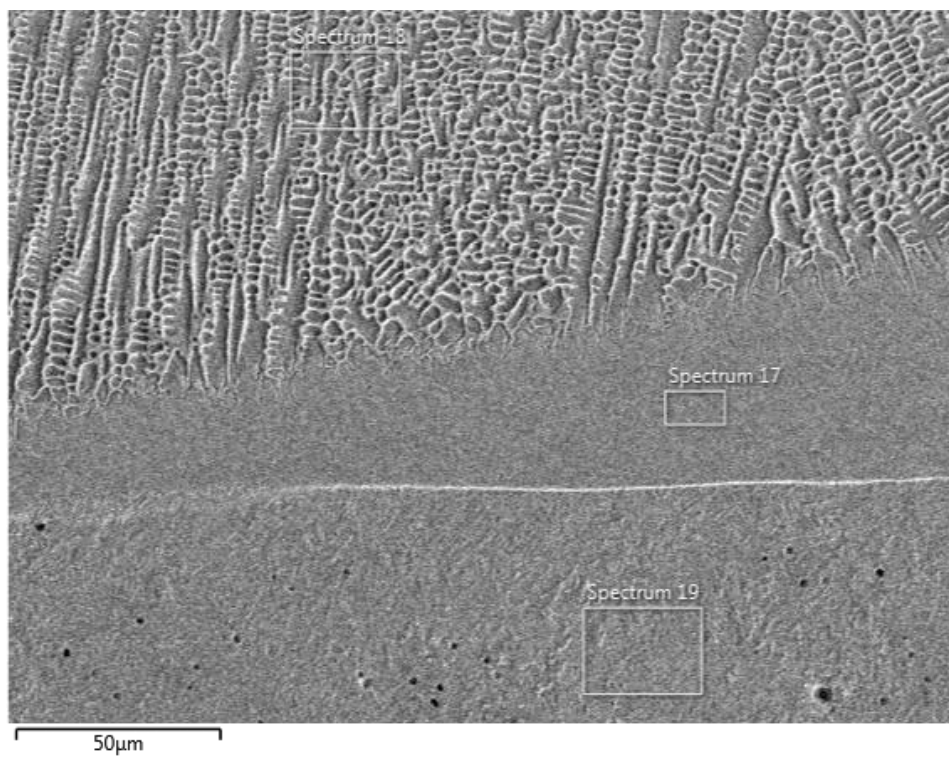
### 5.2.2.1. MetcoClad™ 6

Na Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19 estão apresentadas as microestruturas dos revestimentos utilizando pós novos e reutilizados uma e duas vezes de MetcoClad™ 6, obtidas através de SEM/EDS. As microestruturas são refinadas, resultante do aquecimento e arrefecimento rápido das peças, fazendo com que não haja um elevado crescimento de grão.

Nestas microestruturas são observadas três zonas distintas: o revestimento, sendo evidente as fases dendríticas e as fases interdendríticas, a diluição entre o revestimento e o substrato e a zona do substrato.

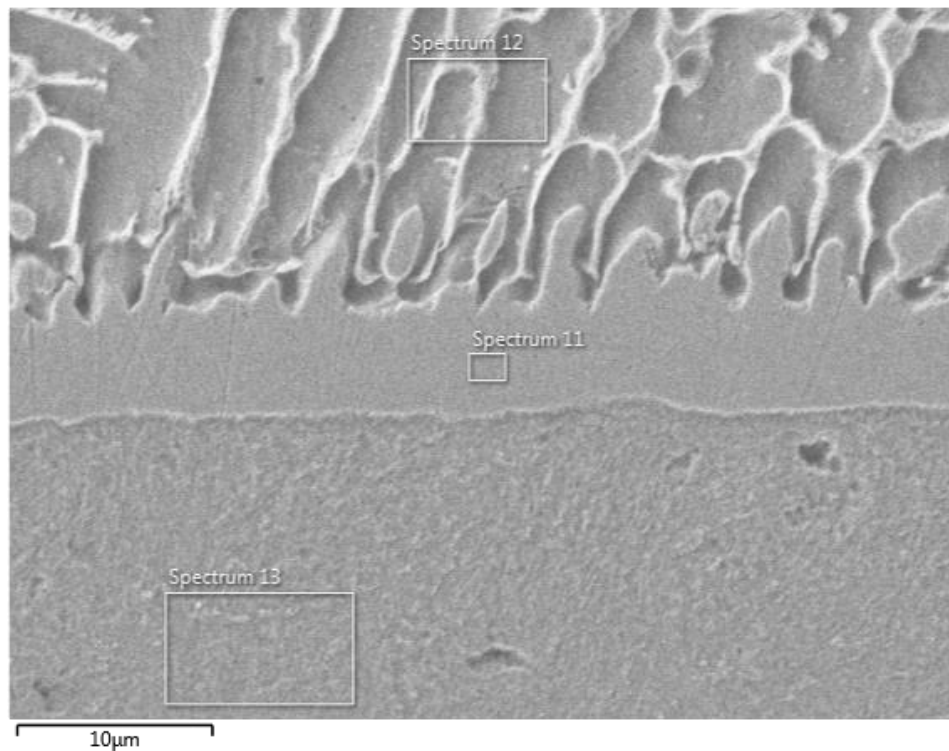


**Figura 5.17.** Microestrutura de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 6.



**Figura 5.18.** Microestrutura de revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.





**Figura 5.19.** Microestrutura de revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.

Na Figura B.1, Figura B.5 e Figura B.9, do apêndice B, estão apresentadas imagens de baixa ampliação, onde é possível observar a totalidade do revestimento, em que foram analisados três pontos: um na extremidade do revestimento, um a meio do revestimento, e outro junto ao substrato.

Como se pode verificar desde a Figura B.2 até à Figura B.12, as composições químicas ao longo do revestimento mantêm-se constante, porém é perceptível o aumento do teor de ferro, em relação às análises à composição química dos pós. Em relação ao pó novo, apesar da diferença, os valores permanecem no intervalo indicado pelo fabricante. No que diz respeito pós reutilizados, o teor de ferro aumenta para valores na ordem dos 8 %.

O aumento do teor de ferro pode ter várias explicações. Como referido no capítulo 4, houve a realização de uma separação magnética. Esta separação deve-se ao facto de, durante o revestimento, se poderem formar salpicos de partículas ferromagnéticas. Com a separação magnética, estas partículas são retiradas do pó, conforme mostram as análises. Porém, a amostra de pó retirada analisada poderia estar praticamente isenta destas partículas e o restante pó não.

Outra explicação para o aumento do teor do ferro, pode ser devido à diluição do substrato. O substrato é rico em ferro e, através da diluição, o teor de ferro pode aumentar no revestimento. Esta hipótese é pouco provável, pois a diluição é quase impercetível.

Um estudo mais aprofundado deveria ser realizado, de modo a justificar este aumento do teor de ferro.

#### **5.2.2.2. MetcoClad™ 52052**

Na Figura 5.20 a), Figura 5.21 a) e Figura 5.22 a) estão apresentadas as microestruturas dos revestimentos obtidos com MetcoClad™ 52052, pó novo, pó reutilizado uma vez e pó reutilizado duas vezes, respetivamente.

Na microestrutura do revestimento com pós novos, observam-se as esferas de carboneto de tungsténio e a matriz. A primeira coisa que se vê é que há zonas em que não existem carbonetos de tungsténio e a sua dimensão parece estar a aumentar com a reutilização do pó.

Através da análise global do revestimento (*Spectrum 110*, *Spectrum 40* e *Spectrum 34*), cujos espectros estão apresentados na Figura 5.20 b), Figura 5.21 b) e Figura 5.22 b), verificam-se algumas discrepâncias em relação aos valores obtidos através da fluorescência de raios X. Estas diferenças devem-se ao facto de se ter utilizado um valor médio para o teor de boro e de carbono, visto que o equipamento de análise de composição química não detetar estes elementos.

Quanto aos pós reutilizados uma e duas vezes, verifica-se uma diminuição no teor de níquel e um aumento no teor de tungsténio, tal como foi verificado nas análises das composições químicas.

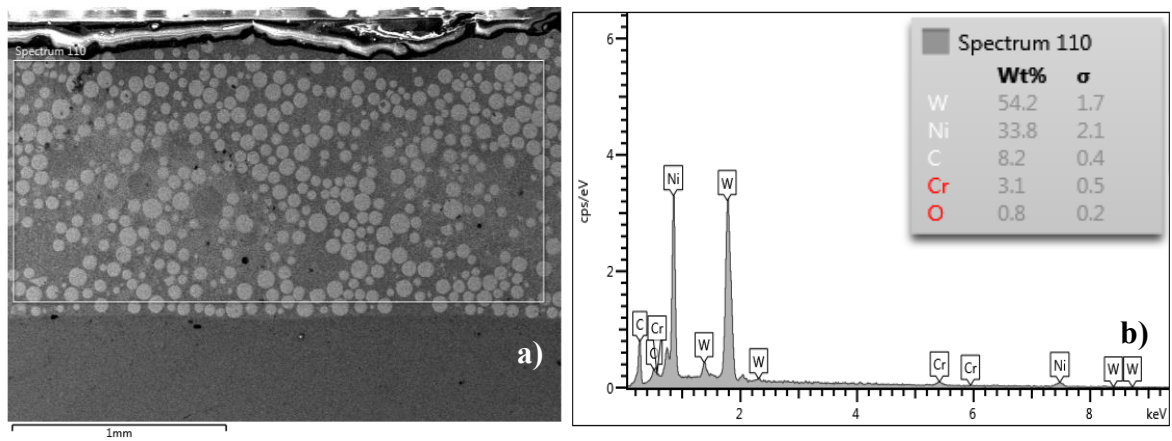


Figura 5.20. Revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 52052: a) Microestrutura; b) Espectro.

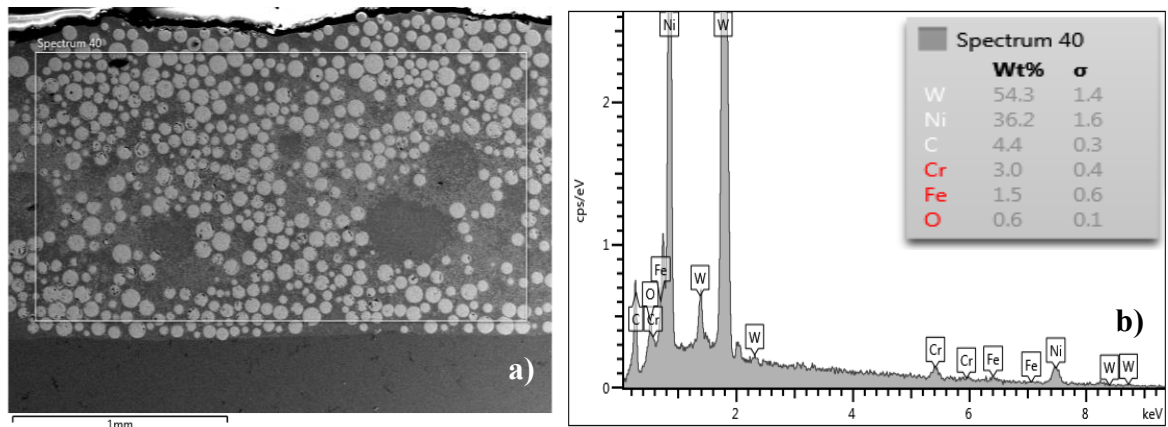


Figura 5.21. Revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052: a) Microestrutura; b) Espectro.

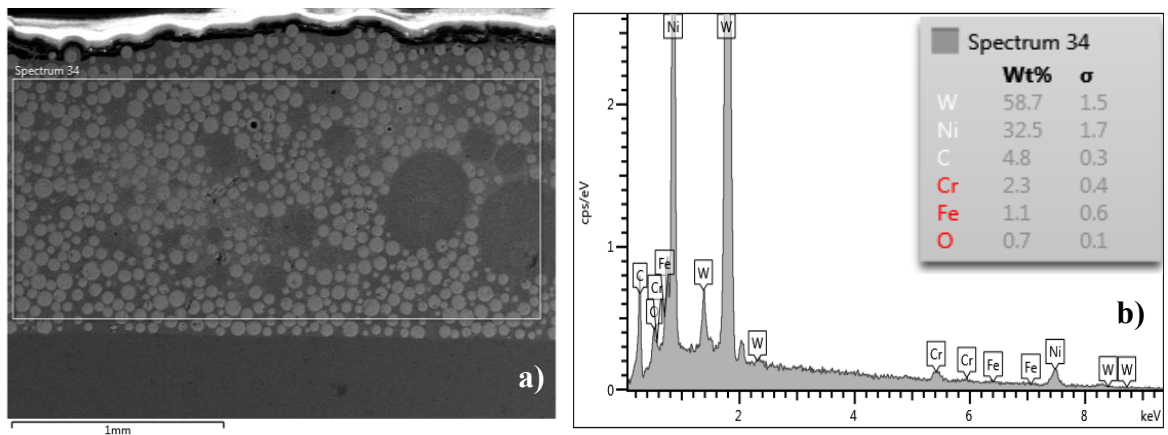


Figura 5.22. Revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052: a) Microestrutura; b) Espectro.

Se se ampliar as figuras da microestrutura, tal como apresentadas na Figura C.1, Figura C.5 e Figura C.9, do apêndice C, verifica-se uma terceira fase, que resulta da fragmentação dos carbonetos de tungsténio devido ao calor fornecido pelo laser. Os espectros estão apresentados imediatamente a seguir às respetivas microestruturas, desde a Figura C.2 até à Figura C.12. Como se esperava, a composição química dos carbonetos de tungsténio não sofre alteração conforme as reutilizações. Verifica-se a diminuição do teor de níquel na matriz, tal como indicado pela análise à composição química.

### 5.2.3. Microdureza

Os ensaios de microdureza Vickers foram efetuados no sentido de verificar a variação da dureza ao longo da profundidade do revestimento, sendo possível determinar a interface entre o revestimento e o substrato, devido à elevada diferença das durezas de ambos. O substrato utilizado é o mesmo, qualquer que seja o tipo de revestimento, apresentando uma microdureza de 210 HV0,1.

Na Figura 5.23 estão traçadas as evoluções da microdureza dos revestimentos obtidos com pós de MetcoClad™ 6. A linha vertical, a preto, é a interface entre o revestimento e o substrato. Verifica-se que não há diferenças significativas nos revestimentos obtidos com pós novos e reutilizados, em que a microdureza média é cerca de 530 HV0,1.

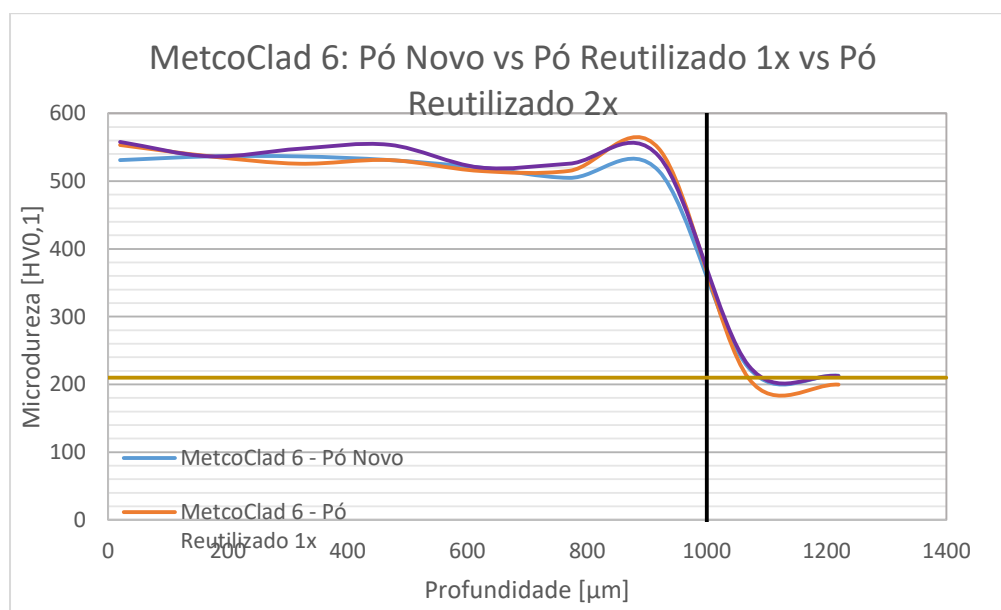


Figura 5.23. Microdureza de revestimentos obtidos com pós de MetcoClad™ 6.

Na Figura 5.24 é apresentada a microdureza dos revestimentos obtidos com pós de MetcoClad™ 52052. Este tipo de revestimentos tem dois tipos de valores de dureza: o primeiro, na ordem de 550 HV0,3, é de indentações realizadas na matriz do revestimento; o segundo, mais elevado, atingindo valores entre 2700 – 3000 HV0,3, é de indentações realizadas nos carbonetos de tungsténio.

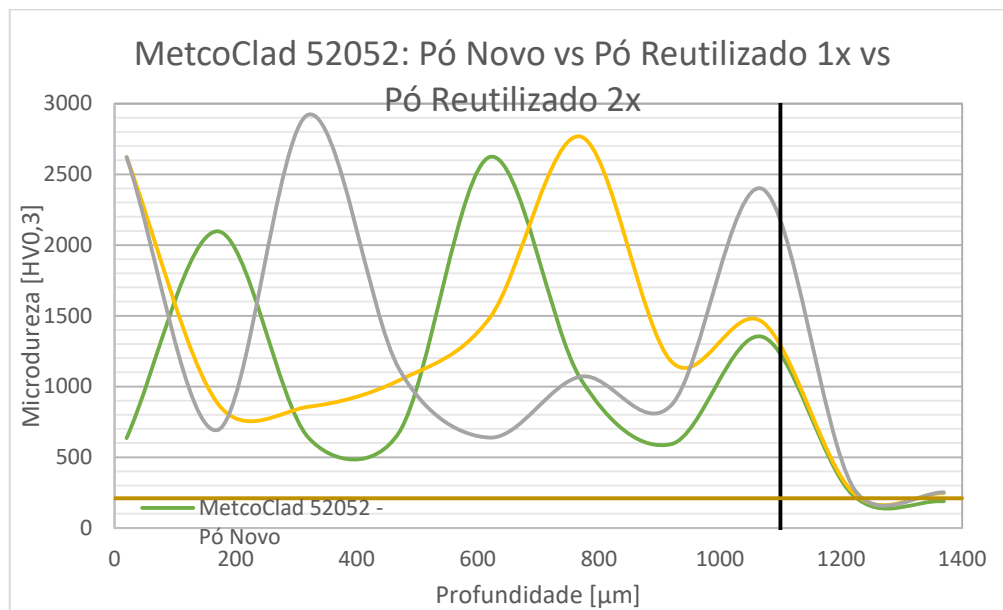


Figura 5.24. Microdureza de revestimentos obtidos com pós de MetcoClad™ 52052.

#### 5.2.4. Macro dureza

Para o ensaio de macro dureza, foram realizadas cinco indentações em vários pontos da superfície dos revestimentos, de forma a averiguar a dureza superficial de todo o revestimento, sendo o indentador um cone de diamante. Na Tabela 5.3 estão expostos os valores de dureza para os revestimentos com pós novos e reutilizados de MetcoClad™ 6 e MetcoClad™ 52052.

Como se pode observar, nota-se uma ligeira diminuição do valor de macro dureza em revestimentos com pó reutilizado de MetcoClad™ 6 em relação ao pó novo. Quanto aos pós de MetcoClad™ 52052, verifica-se que existe alguma variabilidade da dureza quando se utiliza pós reutilizados uma ou duas vezes.

**Tabela 5.3.** Macro dureza dois revestimentos realizado com pós novos e reutilizados.

Material	Média [HRC]	Desvio Padrão [HRC]
MetcoClad™ 6 – Pó Novo	48,10	0,24
MetcoClad™ 6 – Pó Reutilizado 1x	44,96	0,86
MetcoClad™ 6 – Pó Reutilizado 2x	45,18	1,31
MetcoClad™ 52052 – Pó Novo	59,66	2,94
MetcoClad™ 52052 – Pó Reutilizado 1x	60,86	1,70
MetcoClad™ 52052 – Pó Reutilizado 2x	56,94	1,79

### 5.2.5. Ensaios de abrasão

Para este ensaio de desgaste, foram realizados três ensaios por cada tipo de revestimento, estando apresentados na Tabela 5.4 as médias dos valores obtidos. Foi avaliada a massa dos provetes antes e após os ensaios, calculando-se assim a massa perdida. Em seguida determinou-se o volume ocupado por esta massa. Com o equipamento *Alicona InfiniteFocus*, foi possível a obtenção das topografias das superfícies desgastadas e os respectivos mapas de profundidade, apresentados desde a Figura 5.25 até à Figura 5.30, para revestimentos com pós de MetcoClad™ 6, e desde a Figura 5.31 até à Figura 5.36 para revestimentos com pós de MetcoClad™ 52052.

**Tabela 5.4.** Resultados dos ensaios de abrasão.

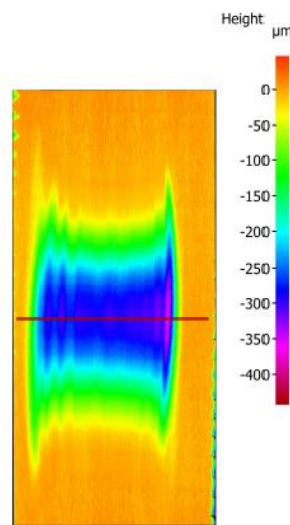
Material	Massa perdida [g]	Desvio padrão [g]	Volume perdido [mm <sup>3</sup> ]	Desvio padrão [mm <sup>3</sup> ]	Profundidade máxima [μm]	Desvio padrão [μm]
MetcoClad™ 6 – Pó Novo	0,51	0,03	63,40	3,20	358,33	18,04
MetcoClad™ 6 – Pó Reutilizado 1x	0,53	0,01	64,03	2,70	370,50	6,36
MetcoClad™ 6 – Pó Reutilizado 2x	0,59	0,02	83,97	2,38	397,67	14,15
MetcoClad™ 52052 – Pó Novo	0,06	0,00	8,43	1,89	69,33	24,11
MetcoClad™ 52052 – Pó Reutilizado 1x	0,07	0,01	7,00	0,30	75,00	26,91
MetcoClad™ 52052 – Pó Reutilizado 2x	0,05	0,01	7,20	1,31	103,67	35,50

Por observação da tabela, verifica-se um aumento de massa perdida conforme o aumento da utilização do pó, 5 % para os revestimentos com pós reutilizados uma vez e 17 % para os revestimentos com pós reutilizados duas vezes, para o caso dos pós de MetcoClad™ 6, e conseqüente aumento de volume perdido. Outra conseqüência do aumento da massa perdida é o aumento da profundidade.

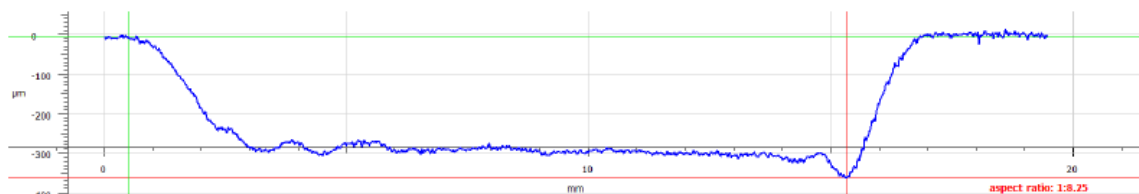
Para os pós de MetcoClad™ 52052, não se verifica variações significativas da massa de material perdida. Em termos de profundidade, verifica-se um aumento conforme o aumento da utilização dos pós, porém, estes valores apresentam maiores desvios, o que significa maior variabilidade.

Na Figura 5.25, Figura 5.27 e Figura 5.29 estão apresentadas as superfícies desgastadas dos revestimentos de MetcoClad™ 6. Como se pode observar, quer para os provetes revestidos com pós novos, como para os provetes revestidos com pós reutilizados, o desgaste mais acentuado é visível no centro dos provetes, zona esta onde o contacto entre a roda e o provete é mais forte. Como se observa pela escala de cores presentes, o desgaste vai diminuindo a intensidade do centro para as extremidades.

Na Figura 5.26, Figura 5.28 e Figura 5.30 estão apresentados os mapas de profundidades de desgaste por abrasão para os revestimentos obtidos com pós novos e reutilizados. Como se pode observar, o desgaste dos revestimentos foi praticamente uniforme ao longo da linha de análise, todavia, verificam-se alguns picos nos pós reutilizados, que correspondem a poros presentes nos revestimentos. Na Figura D.1, Figura D.2 e Figura D.3, no apêndice D, é possível observar microscopias óticas das superfícies, onde são visíveis poros nos revestimentos obtidos com pós reutilizados, com uma ampliação de 5x.

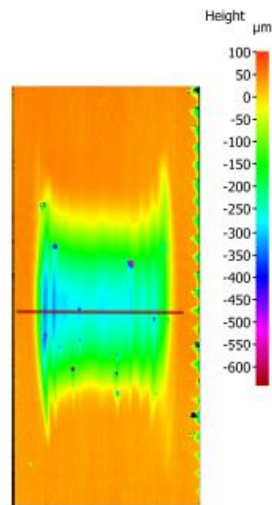


**Figura 5.25.** Superfície desgastada de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 6.





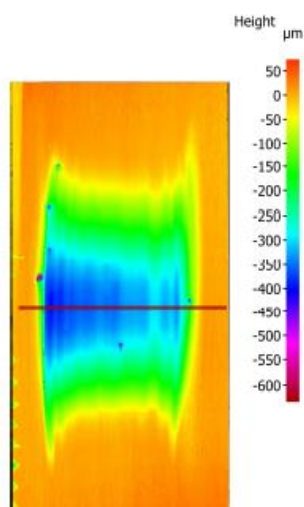
**Figura 5.26.** Mapa de profundidade de desgaste por abrasão de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 6.



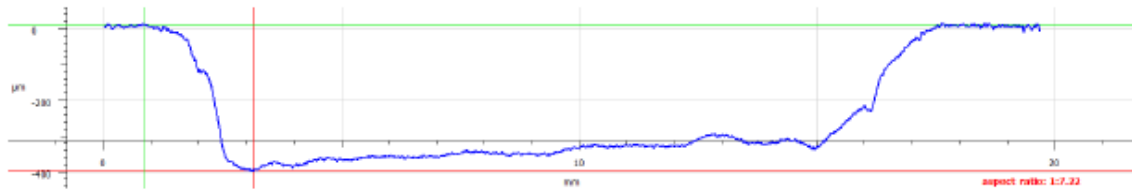
**Figura 5.27.** Superfície desgastada de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.



**Figura 5.28.** Mapa de profundidade de desgaste por abrasão de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.



**Figura 5.29.** Superfície desgastada de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.

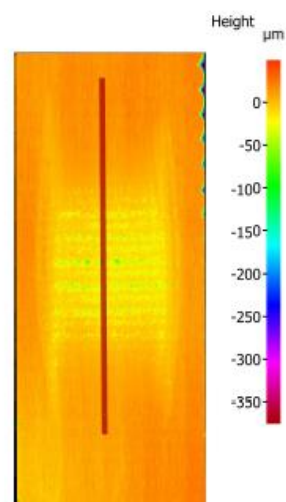


**Figura 5.30.** Mapa de profundidade de desgaste por abrasão de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.

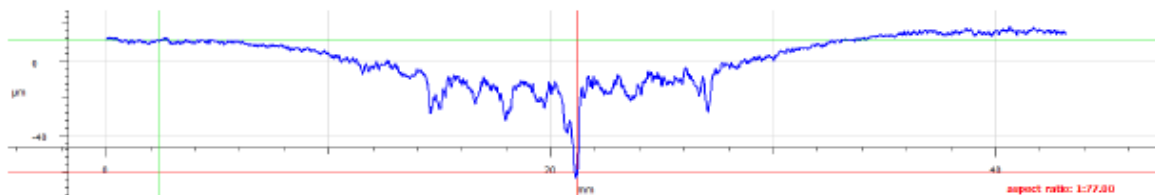
Na Figura 5.31, Figura 5.33 e Figura 5.35 estão apresentadas as superfícies desgastadas dos provetes de MetcoClad™ 52052. Através dos esquemas de cores, verifica-se que o desgaste deste tipo de revestimentos não é muito elevado.

Na Figura 5.32, Figura 5.34 e Figura 5.36 estão apresentados os mapas de profundidades de desgaste por abrasão para os revestimentos obtidos com pós novos e reutilizados. Para os pós novos, bem como para os pós reutilizados, observa-se que o desgaste não é uniforme, porém verifica-se um comportamento semelhante entre os mapas de profundidade dos revestimentos com pós novos e reutilizados. Os picos visíveis nos mapas de profundidade correspondem a uma menor concentração de carbonetos na zona analisada.

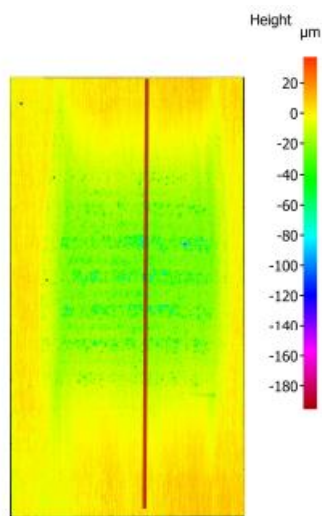
Através da análise destes mapas de profundidade e dos valores presentes na Tabela 5.4, pode dizer-se que os revestimentos com pós novos e reutilizados de MetcoClad™ 52052 têm um comportamento semelhante, no que diz respeito à abrasão.



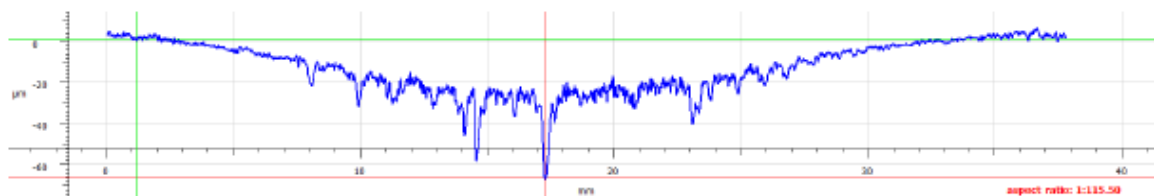
**Figura 5.31.** Superfície desgastada de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 52052.



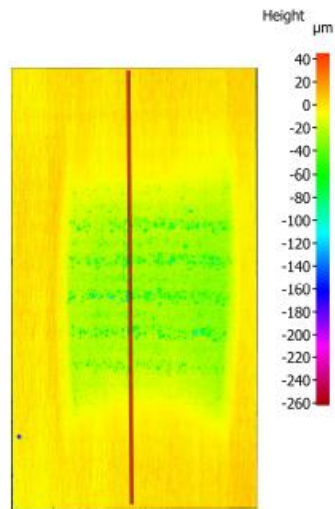
**Figura 5.32.** Mapa de profundidade de desgaste por abrasão de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 52052.



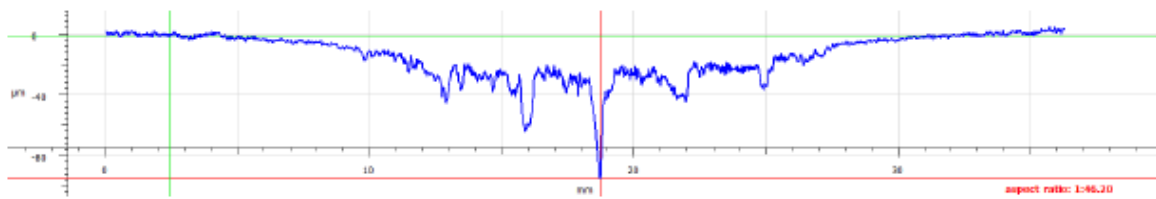
**Figura 5.33.** Superfície desgastada de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052.



**Figura 5.34.** Mapa de profundidade de desgaste por abrasão de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052.



**Figura 5.35.** Superfície desgastada de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052.



**Figura 5.36.** Mapa de profundidade de desgaste por abrasão de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052.

## 6. ANÁLISE ECONÓMICA

Durante o ano de 2018, foram utilizados 209,52 kg de MetcoClad™ 6 e 116,43 kg de MetcoClad™ 52052. Sabe-se que o custo de MetcoClad™ 6 é de 92,55 €/kg e o de MetcoClad™ 52052 é de 70,64 €/kg.

Na Figura 6.1 estão apresentadas umas peças que se pretendem revestir e na Figura 6.2 estão representadas as peças já revestidas, sendo utilizado MetcoClad™ 6, sobre as quais foi feita a análise económica em estudo.

Para o revestimento, foram utilizadas 4516 g de material. Após o revestimento, recolheu-se o pó desperdiçado, ao qual se fez a peneiração, tendo-se obtido 1363 g. Este material é normalmente desperdiçado, porém, através dos ensaios realizados neste trabalho, concluiu-se que o pó pode ser reutilizado. Este desperdício corresponde a cerca de 30% do material utilizado. Fazendo a análise ao ano de 2018, e considerando que a eficiência de deposição se mantém constante, conclui-se que se desperdiçou, em média, cerca de 62,86 kg, que corresponde a custos de 5817,69 €.

Aplicando este material para um novo revestimento, e considerando a mesma eficiência, é possível reaproveitar cerca de 30 % de material reutilizado uma vez, ou seja, 18,86 kg. Reutilizando uma segunda vez, mantendo-se constante a eficiência, desperdiça-se cerca de 5,66 kg de material, sendo que estes pós não voltam a ser reutilizados. Estes pós desperdiçados correspondem a custos de 523,83 €.

Sendo que os pós de MetcoClad™ 6 têm um custo de 92,55 €/kg, é possível reduzir os custos com este tipo de material em 5293,86 €/ano, com base nos dados de consumo de 2018.



**Figura 6.1.** Peças antes de revestimento.



**Figura 6.2.** Peças após revestimento.

Para o cálculo do pó desperdiçado de MetcoClad™ 52052, a abordagem foi diferente. Foram consultadas folhas de obra, onde estavam indicadas as massas antes e após revestimento, bem como o material utilizado. Através da diferença de massa, determinou-se a massa de material aplicado na peça. Dividindo a massa aplicada na peça pela massa de material utilizado, obteve-se a percentagem de desperdício. Com este tipo de pós, determinou-se um desperdício de cerca de 50 %.

Sendo que foram utilizados cerca de 116,43 kg de material, assumindo o desperdício de 50 %, conclui-se que se desperdiçou cerca de 58,22 kg de material, que correspondem a custos de 4112,66 €.

Aplicando este material para um novo revestimento, reduz-se o desperdício em 29,11 kg. Reutilizando pela segunda vez estes pós, considerando a eficiência de 50 %, são desperdiçados 14,56 kg de material, que correspondem a custos de 1028,52 €.

Sendo o custo dos pós novos de MetcoClad™ 52052 de 70,64 €/kg e, considerando que é possível reutilizar os pós duas vezes, é possível reduzir os custos com este tipo matéria-prima em cerca de 3084,14 €, com base nos dados de consumo de 2018.

Com a implementação de duas reutilizações com os dois tipos de pós, é possível uma redução de custos em cerca de 8378,00 €/ano, tornando assim a empresa ainda mais competitiva.





## 7. CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho, foi possível retirar conclusões sobre a reutilização de pós de MetcoClad™ 6 e MetcoClad™ 52052.

Para os pós de MetcoClad™ 6, não há grandes alterações na composição química do pó, bem como não se verifica diferenças significativas na distribuição do tamanho de partículas. Em termos de forma das partículas, verifica-se um aumento de partículas alongadas conforme o aumento da reutilização dos pós. Observa-se também o surgimento de poros, nos revestimentos com pós reutilizados. Com a manipulação de alguns parâmetros do equipamento laser, nomeadamente a potência, é possível reduzir a porosidade dos revestimentos.

A microdureza dos revestimentos com pós novos e com pós reutilizados é semelhante, todavia a macrodureza diminui para os pós reutilizados. Em termos de ensaios de abrasão, os revestimentos com pós reutilizados perderam mais massa que os revestimentos com pós novos, 5 % para revestimentos com pós reutilizados uma vez e 17 % para revestimentos com pós reutilizados duas vezes.

Para este tipo de pós, conclui-se que a reutilização pode ser viável, mas para aplicações onde o cliente não seja muito exigente.

Para os pós de MetcoClad™ 52052, há uma diminuição do teor de níquel. Relativamente à forma e distribuição do pó, não há diferenças significativas. Verifica-se um refinamento do pó para os pós reutilizados, embora seja pouco significativo. A proporção de carbonetos de tungsténio presentes na matriz mantém-se ao longo das reutilizações. A microdureza depende da localização da indentação, mas no geral mantém-se os valores esperados. A macrodureza apresenta alguma variabilidade, devendo-se ao teor de carbonetos presentes na indentação. Quanto aos ensaios de abrasão, verificam-se comportamentos similares entre os revestimentos com pós novos e com pós reutilizados.

Para este tipo de pós, conclui-se que podem ser reutilizados duas vezes, sem que se verifiquem grandes diferenças nas propriedades dos revestimentos.

Com a implementação da reutilização dos pós, a empresa tem uma redução de custos na ordem dos 8378,00 €/ano com base nos dados de consumo de 2018.

## **7.1. Propostas para futuros trabalhos**

Para complementar este trabalho seria interessante avaliar até onde é possível a reutilização dos pós, isto é, determinar o limite para o qual deixa de ser viável a reutilização dos pós.

Outra questão que ficou por resolver foi o aumento do teor de ferro nos revestimentos obtidos com pós reutilizados de MetcoClad<sup>TM</sup> 6; seria interessante a realização de um estudo para justificar este acontecimento.

Seria também interessante a realização de um estudo onde se mistura uma determinada percentagem de pó reutilizado em pó novo.

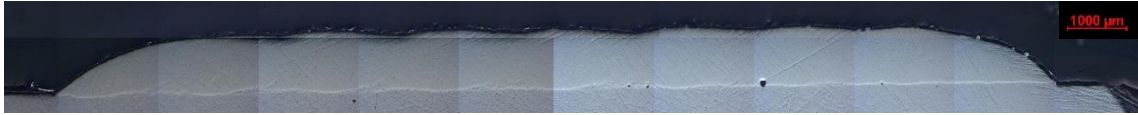
---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab, O. (2015) «Atmospheric plasma spray process and associated spraying jet». Em International Conference on Thermal spraying, 77, 35–42.
- Allemann, I. B. e Kaufman, J. (2011) «Laser principles». Em Basics in Dermatological Laser Applications. Current Problems in Dermatology, 42, 7–23.
- Atamert, S., e Bhadeshia, H. K. D. H. (1989) «Comparison of the microstructures and abrasive wear properties of stellite hardfacing alloys deposited by arc welding and laser cladding». Em Metallurgical and Materials Transactions A, 20, 1037–54.
- Borges, B., Quintino, L., Miranda, R. M. e Carr, P. (2010) «Imperfections in laser cladding with powder and wire fillers». Em The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 50, 175–83.
- Carroll, P. A., Brown, P., Ng, G., Scudamore, R., Pinkerton, A. J., Syed, W., Sezer, H., Li, L. e Allen, J. (2006) «The Effect of Powder Recycling in Direct Metal Laser Deposition on Powder and Manufactured Part Characteristics». Cost Effective Manufacture via Net-Shape Processing, 18-1-18–10.
- Catunda, T., A. Pataia, A. Romero, e J. S. L. A. O. Nunes. 1998. «Laser de Semicondutor Visível : um Instrumento Didático de Baixo Custo». *Revista Brasileira de Ensino de Física* 20: 230–37.
- BOBST «CVD Technology - Chemical vapour deposition». Acedido em junho de 2019, em: <https://www.bobst.com/baen/products/vacuum-coating-metallizing/vacuum-coaters-metallizers/overview/machine/cvd-technology/#.XRngNOhKhPY>
- Flame Spray Technologies. Acedido em junho de 2019, em: <https://www.fst.nl/systems/>
- Hlosta, J., Zuroveka, D., Jezerska, L., Zegzulka, J. e Necas, J. (2016) «Effect of Particle Shape and Size on the Compressibility and Bulk Properties of Powders in Powder Metallurgy». Em Metal 2016: 25Th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, 1394–1399.
- Impact Coatings «PVD technology». Acedido em abril de 2019, em: <http://www.impactcoatings.com/pvd-technology/>
- Kannatey-Asibu, E. (2009). «Types of Lasers». Em Principles of laser materials processing, 135.
- Melles Griot (2009) «Basic laser principles». Em Introduction to Laser Technology. Acedido em fevereiro de 2019, em: <http://www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/Lasers.pdf>
- Oerlikon Metco (2010) «High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Solutions». Acedido em abril de 2019, em: [https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon\\_BRO-0008.7\\_HVOFSolutions\\_EN.pdf&download=1](https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_BRO-0008.7_HVOFSolutions_EN.pdf&download=1)
- Oerlikon Metco (2014) «Atmospheric Plasma Spray Solutions». Acedido em abril de

- 2019, em: <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/processes/atmospheric-plasma/>
- Oerlikon Metco (2015) «Material Product Data Sheet Cobalt-Chromium-Silicon-Carbon (Stellite and Ultimet) Alloy Powders for Laser Cladding». Acedido em abril de 2019, em: [https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon\\_DSMW-0003.4\\_CoSuperalloy\\_LC.pdf&download=1](https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_DSMW-0003.4_CoSuperalloy_LC.pdf&download=1)
- Oerlikon Metco (2016a) «Electric Arc Wire Spray». Acedido em abril de 2019, em: [https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon\\_BRO-0007.7\\_Arc\\_Solutions\\_Brochure\\_EN.pdf&download=1](https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_BRO-0007.7_Arc_Solutions_Brochure_EN.pdf&download=1)
- Oerlikon Metco (2016b) «Material Product Data Sheet Tungsten Carbide - Nickel Alloy Powder Blends for Laser Cladding». Acedido em abril de 2019, em: [https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon\\_DSMW-0014.3\\_WC-NiCrBSi\\_LC.pdf&download=1](https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_DSMW-0014.3_WC-NiCrBSi_LC.pdf&download=1)
- Privev - Surface Technology «PVD Decorativo». Acedido em abril de 2019, em: <https://www.privev.com/pt/revestimentos/pvd-decorativo>
- Ramada Aços, S.A. «C 1» Acedido em fevereiro de 2019, em: <https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-ao-carbono/c1.html>
- Renderos, M., Torregaray, A., Gutierrez-Orrantia, E., Saintier, N. e Girot, F. (2017) «Microstructure characterization of recycled IN718 powder and resulting laser clad material». Em *Materials Characterization*, 134, 103–13.
- Silva, C. M. (2006) «Radiação Laser». Acedido em fevereiro de 2019, em: [http://w3.uagl.pt/~cmsilva/documentos/Apontamentos\\_Capítulo9\\_Física\\_Radiações.pdf](http://w3.uagl.pt/~cmsilva/documentos/Apontamentos_Capítulo9_Física_Radiações.pdf)
- TEandM - Tecnologia e Engenharia de Materiais, S.A. Acedido em fevereiro de 2019, em: <http://www.teandm.pt/>
- Toyserkani, E., Khajepour, A. e Corbin, S. (2017). «Laser Cladding». Em New York, 221.

## APÊNDICE A



**Figura A.1.** Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós novos de MetcoClad™ 6.



**Figura A.2.** Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.



**Figura A.3.** Micrografia da secção transversal de revestimentos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.



## APÊNDICE B

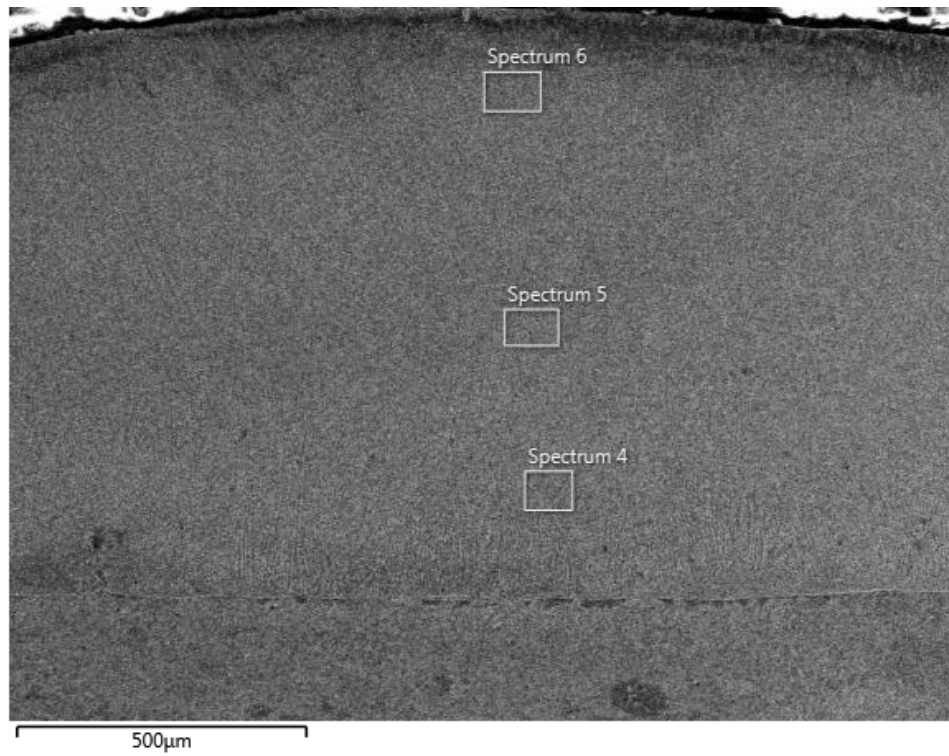


Figura B.1. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 6.

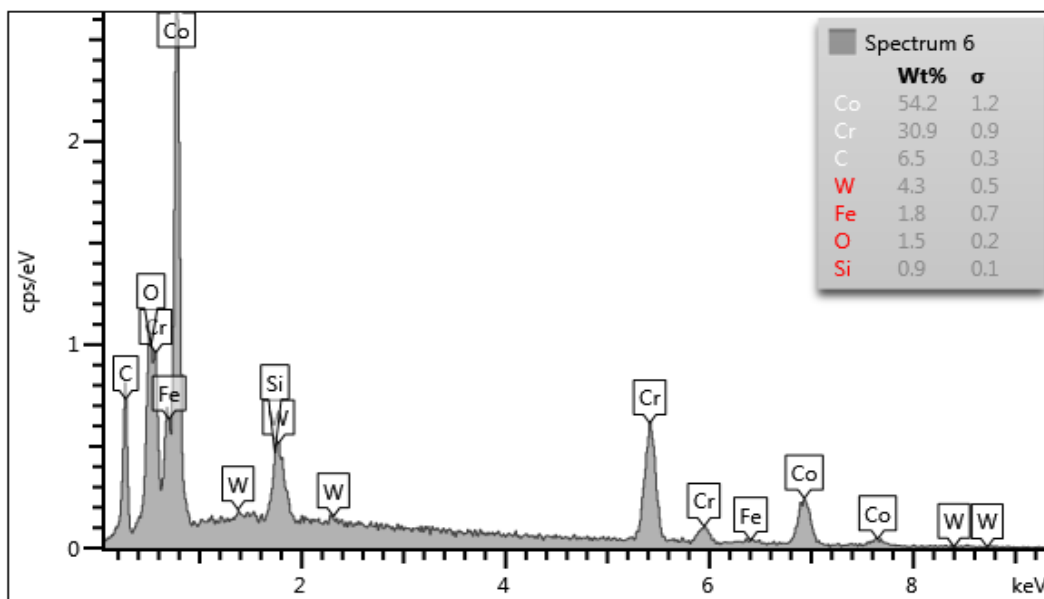


Figura B.2. Espectro da microestrutura no topo do revestimento, com pós novos de MetcoClad™ 6.

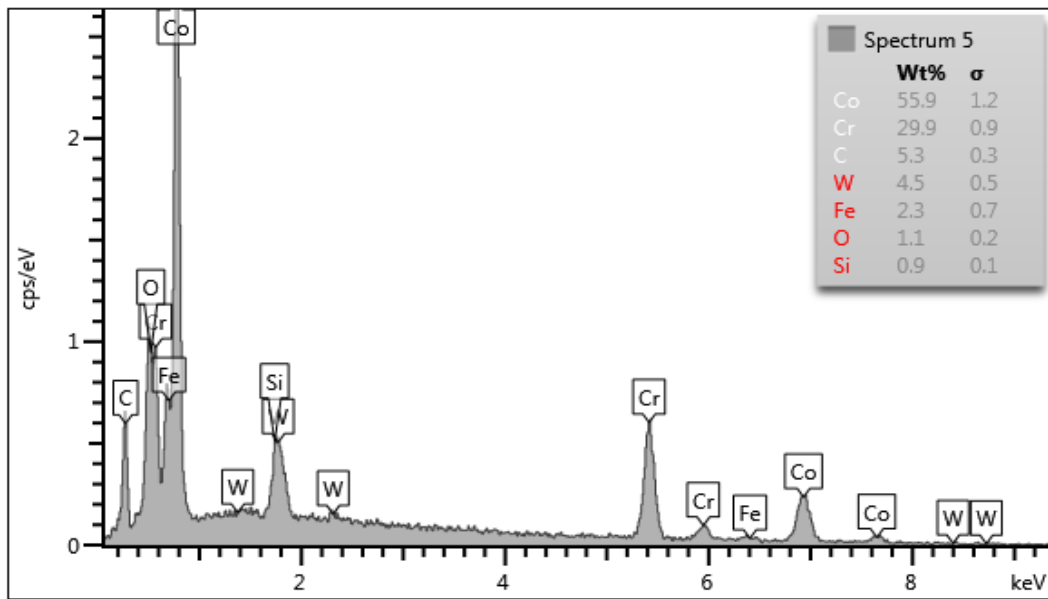


Figura B.3. Espectro da microestrutura a meio do revestimento, com pós novos de MetcoClad™ 6.

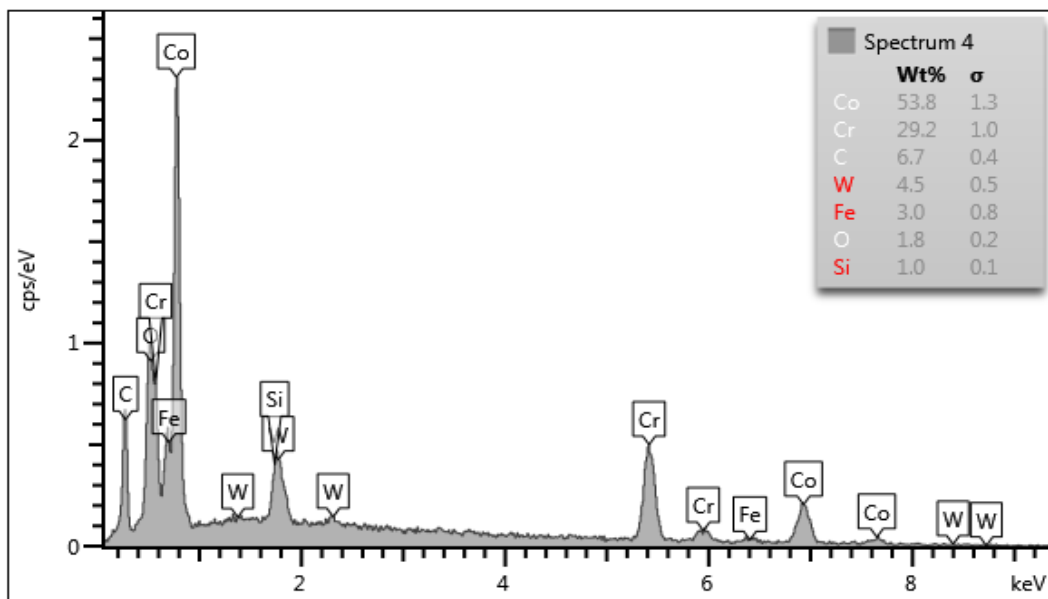


Figura B.4. Espectro da microestrutura junto ao substrato, com pós novos de MetcoClad™ 6.



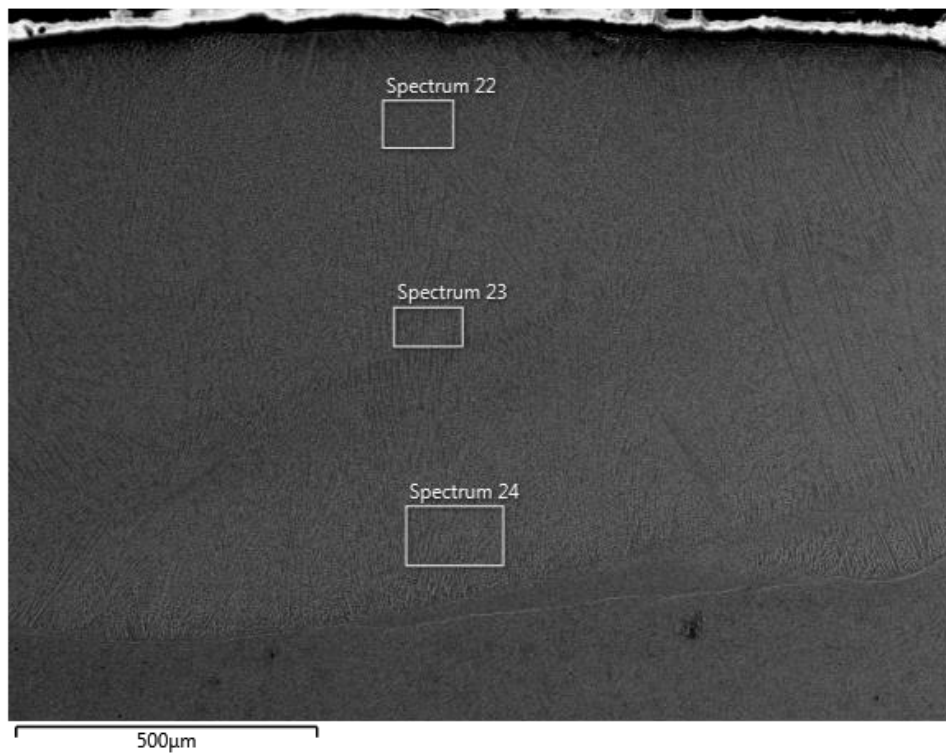


Figura B.5. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.

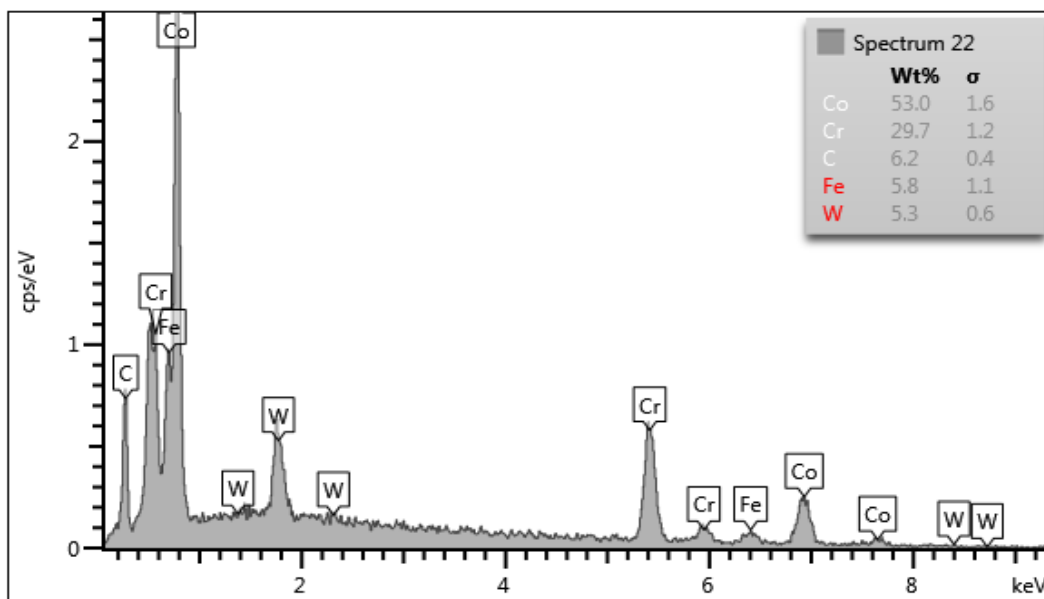


Figura B.6. Espectro da microestrutura no topo do revestimento, com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.

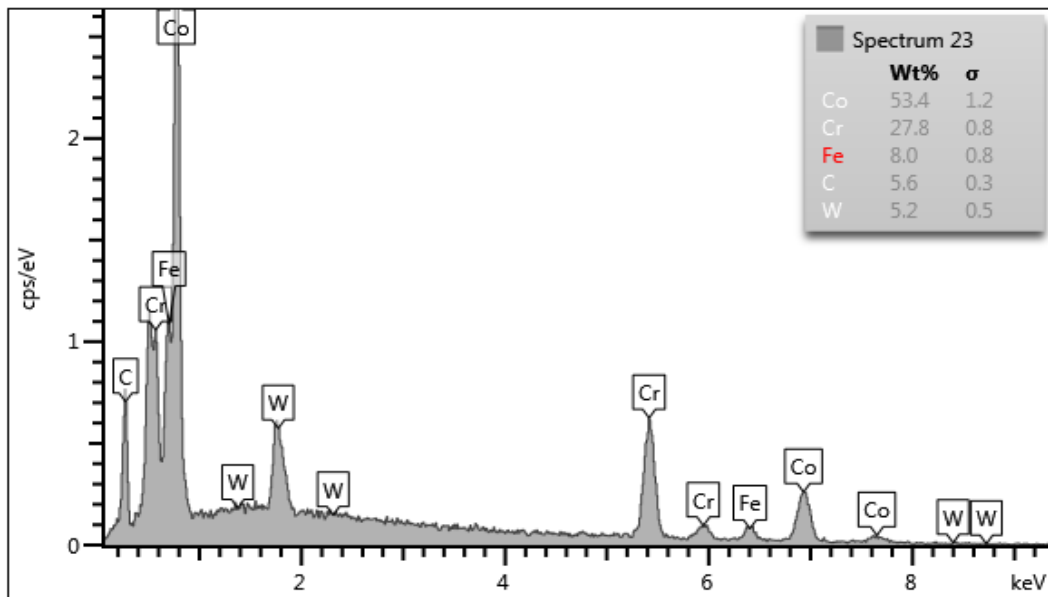


Figura B.7. Espectro da microestrutura a meio do revestimento, com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.

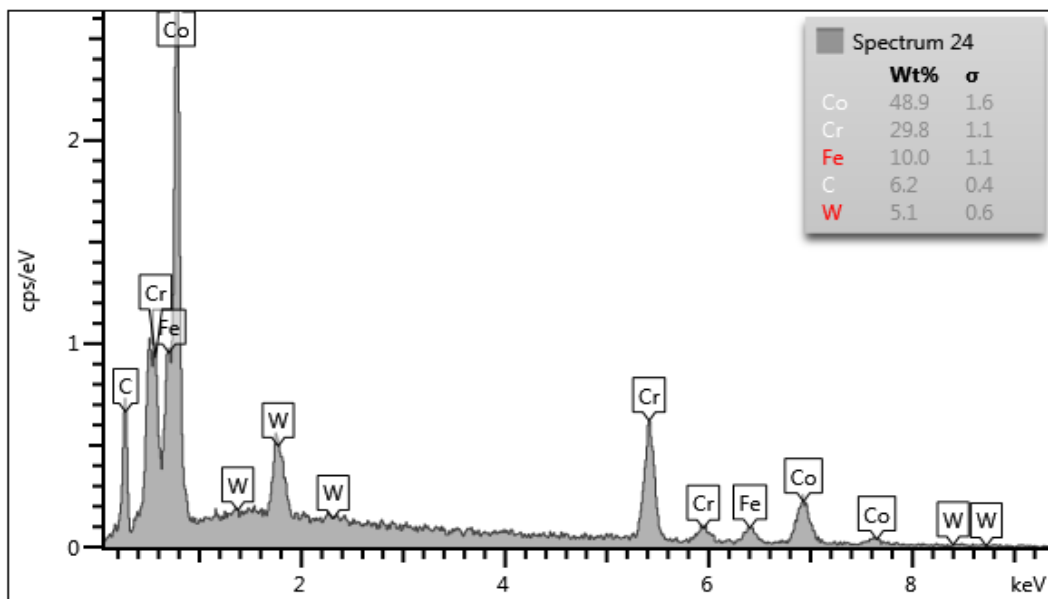


Figura B.8. Espectro da microestrutura junto ao substrato, com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.

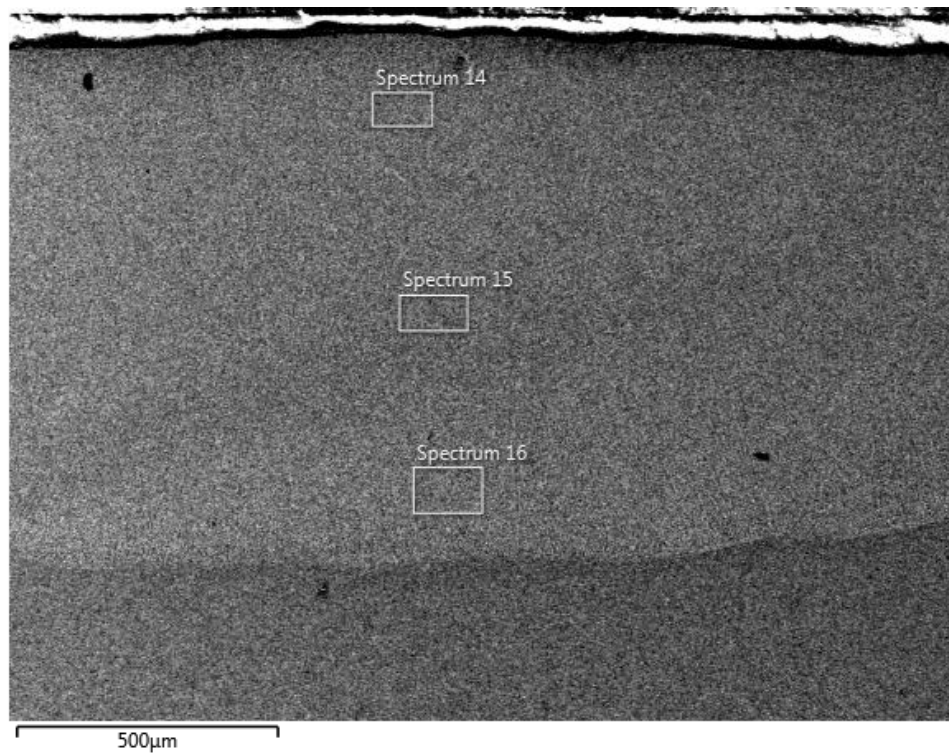


Figura B.9. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.

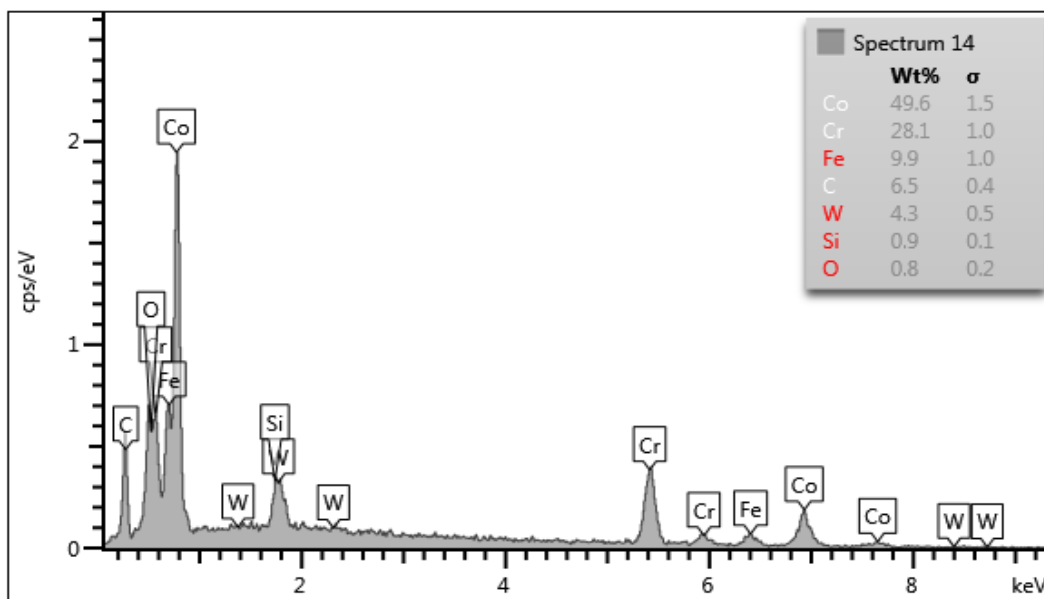


Figura B.10. Espectro da microestrutura no topo do revestimento, com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.

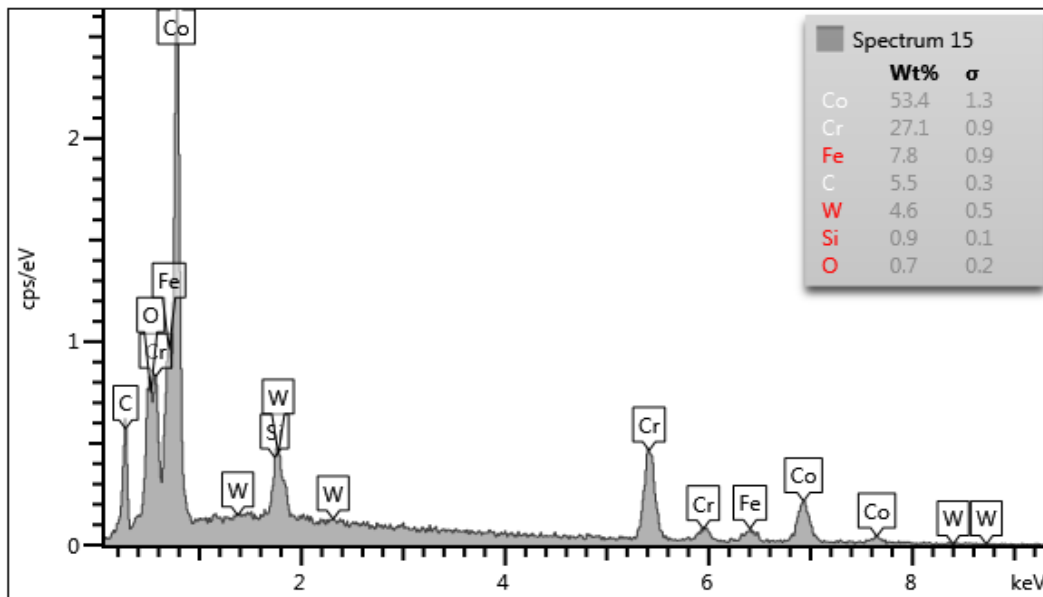


Figura B.11. Espectro da microestrutura a meio do revestimento, com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.

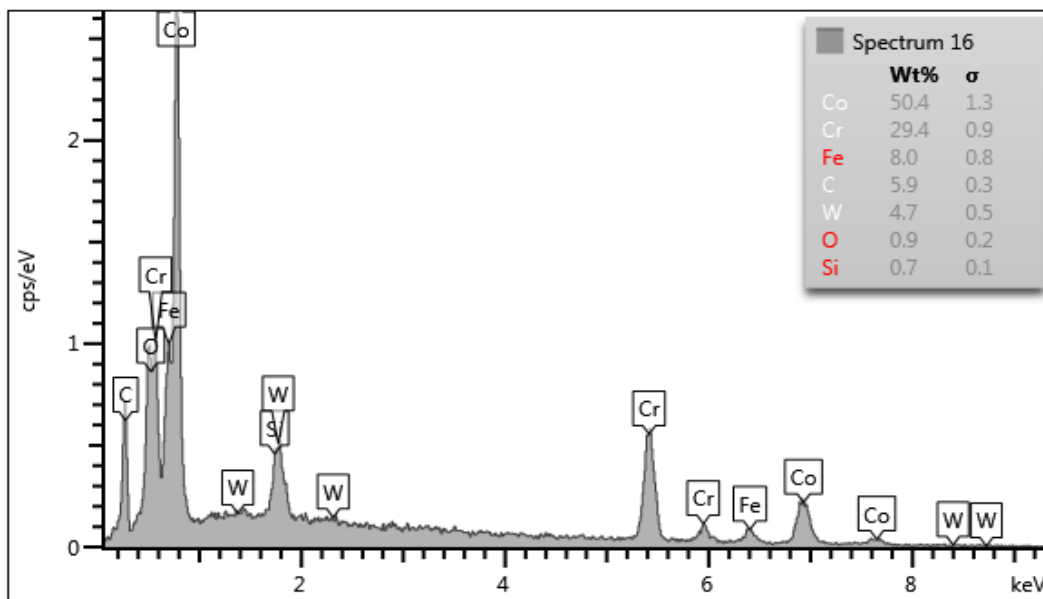


Figura B.12. Espectro da microestrutura junto ao substrato, com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.

## APÊNDICE C

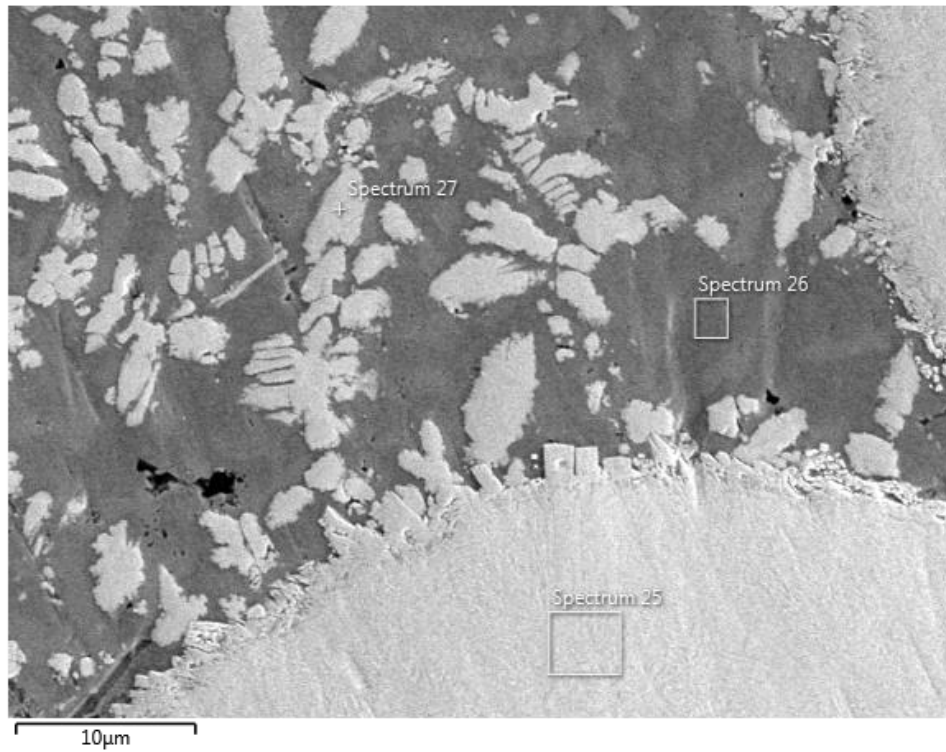


Figura C.1. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 52052.

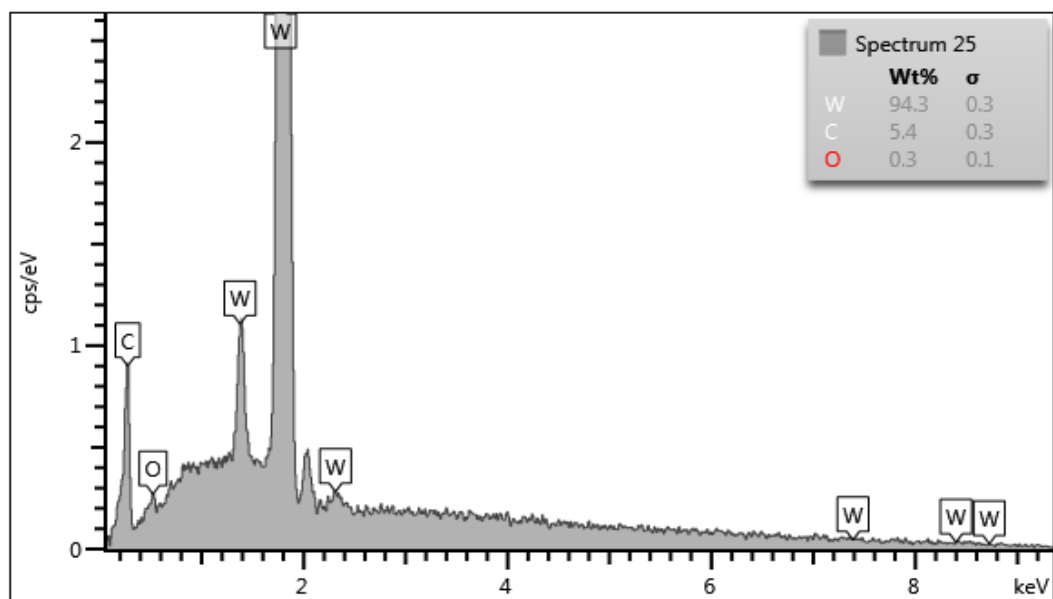


Figura C.2. Espectro dos carbonetos de tungstênio de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 52052.

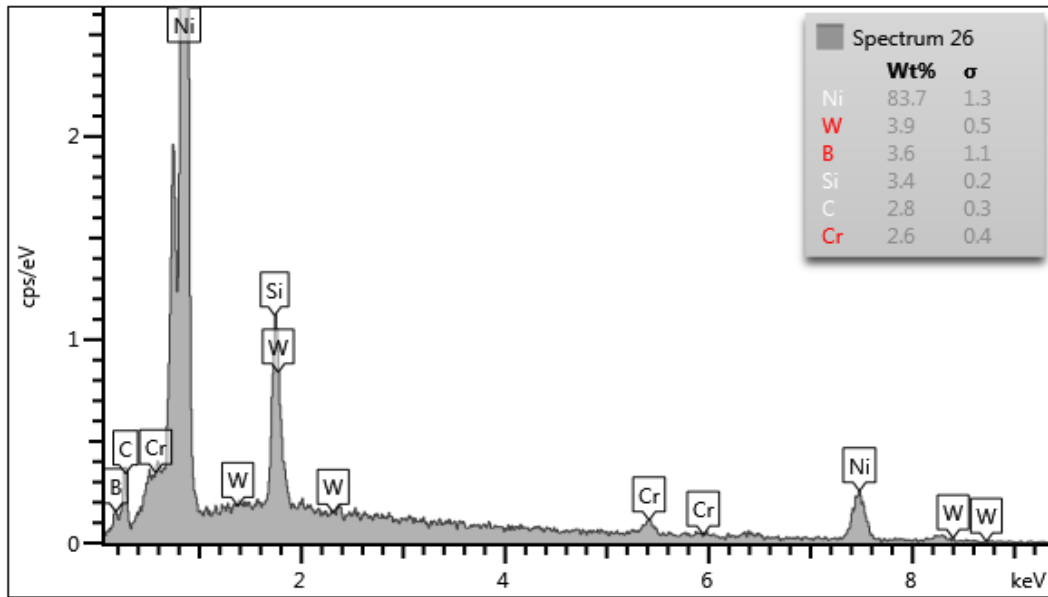


Figura C.3. Espectro da matriz de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 52052.

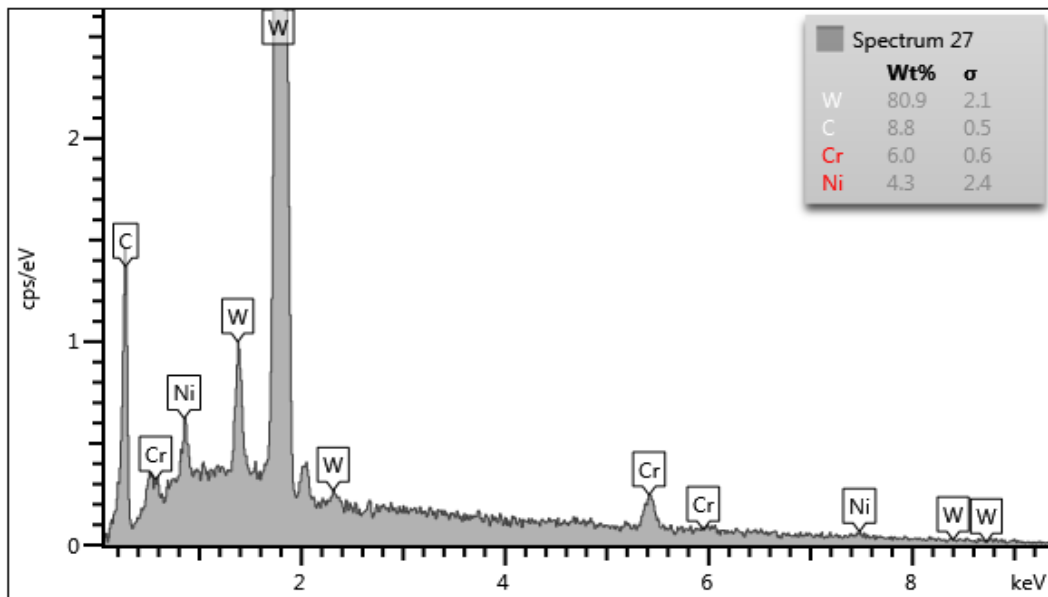


Figura C.4. Espectro dos fragmentos de carbonetos de tungstênio de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 52052.

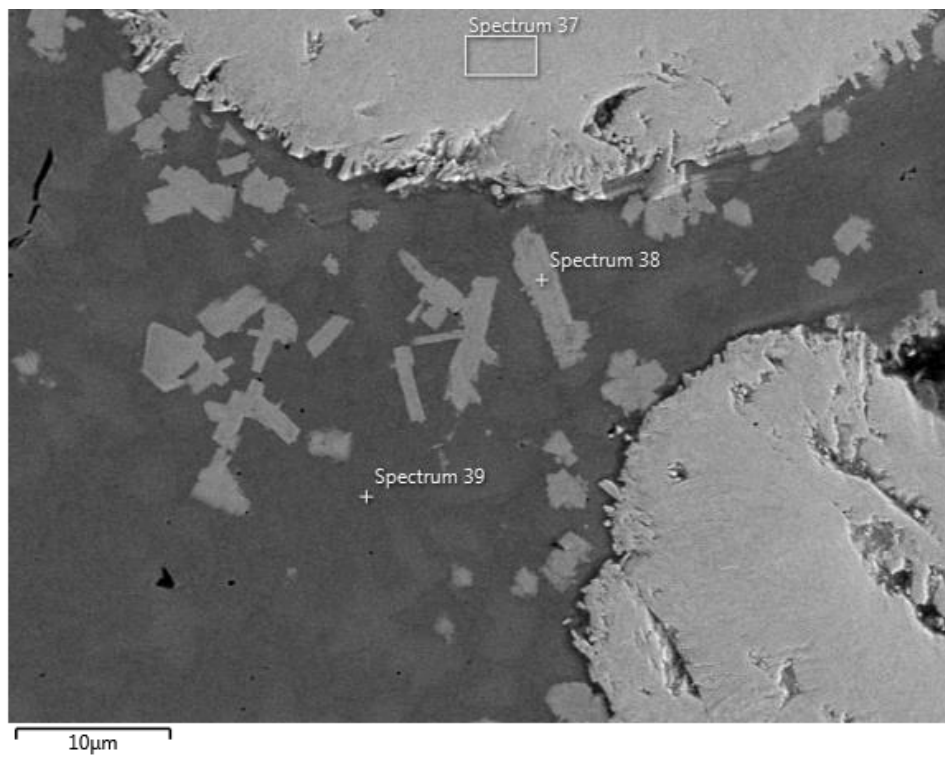


Figura C.5. Microestrutura de revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052.

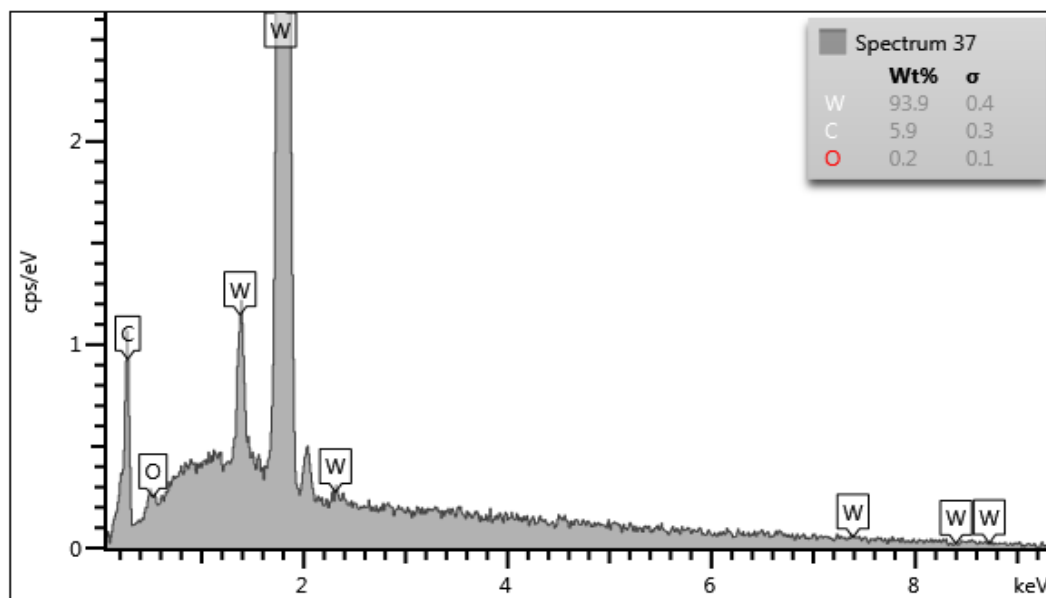


Figura C.6. Espectro dos carbonetos de tungstênio de revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052.

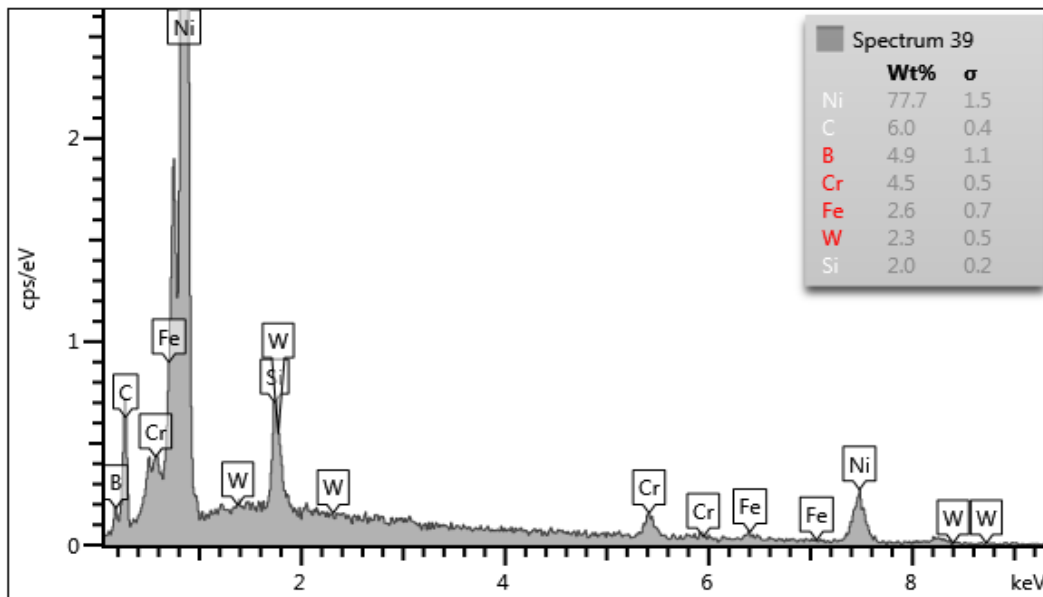


Figura C.7. Espectro da matriz de revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052.

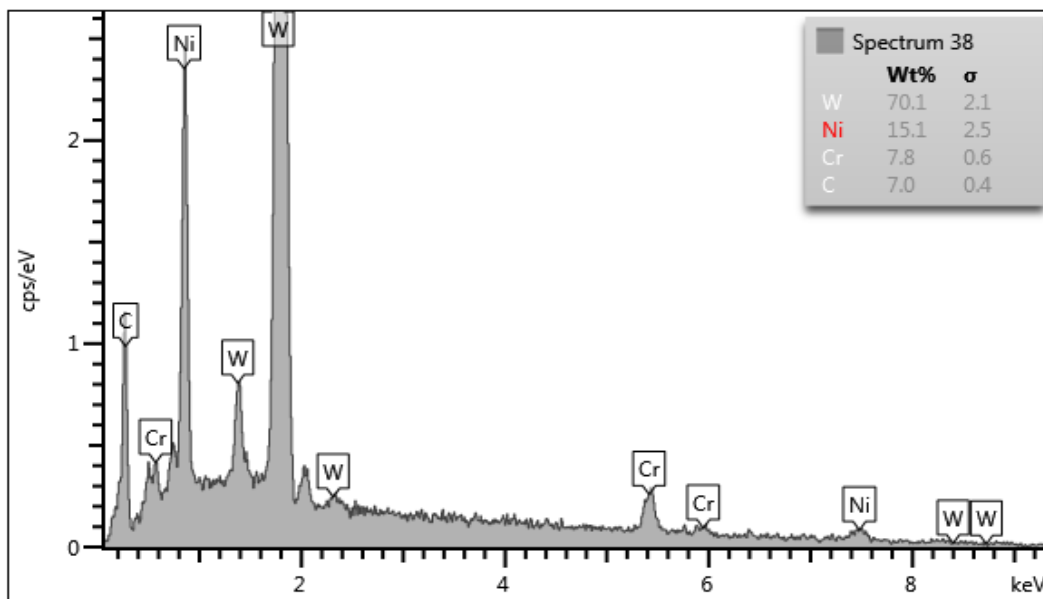
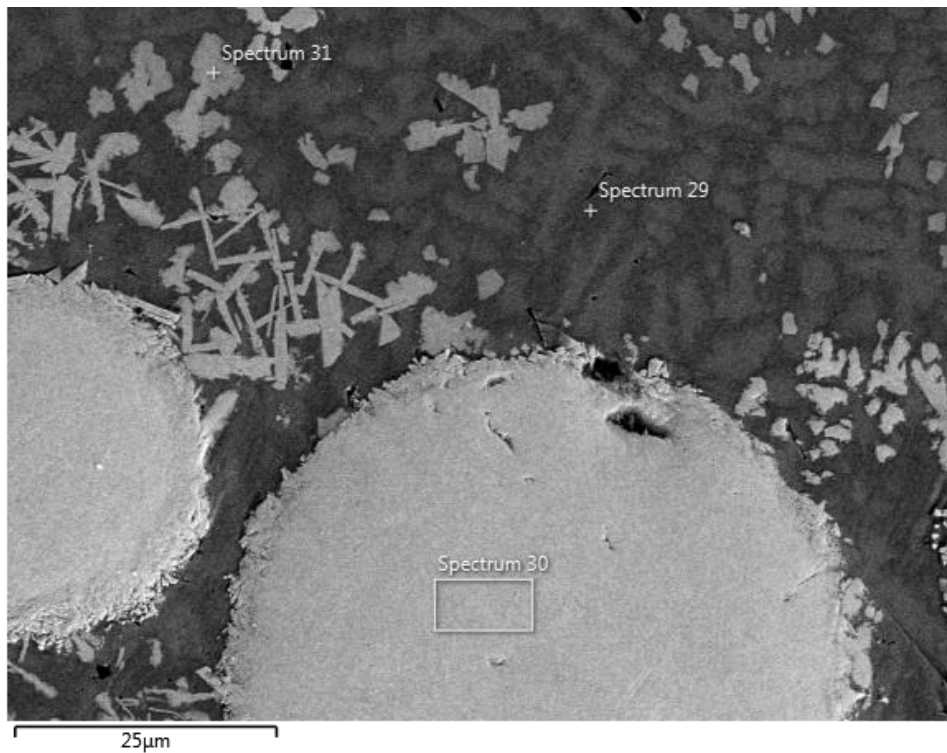
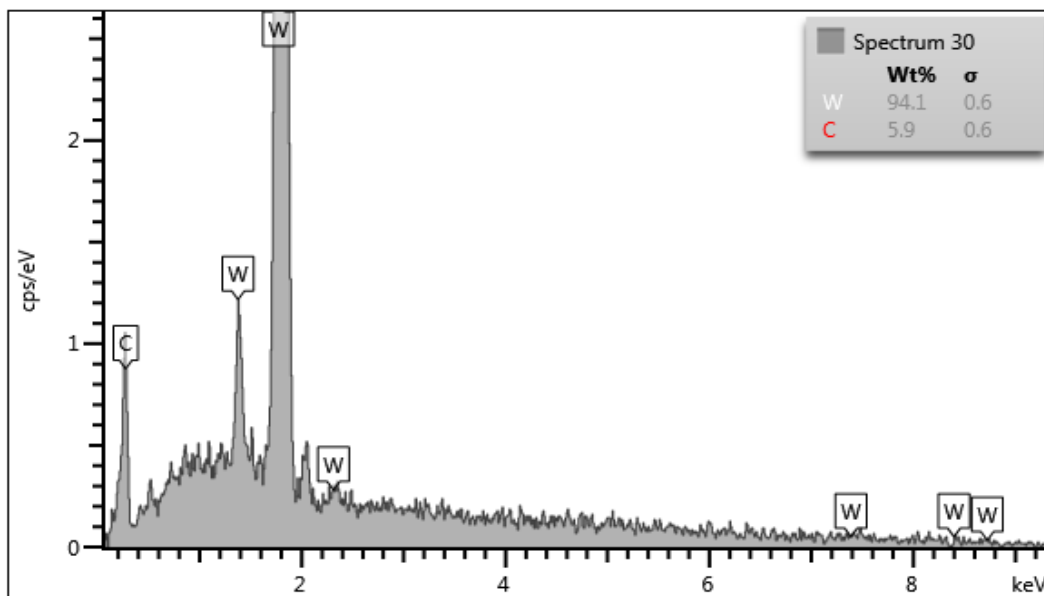


Figura C.8. Espectro dos fragmentos de carbonetos de tungstênio de revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 52052.





**Figura C.9.** Microestrutura de revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052.



**Figura C.10.** Espectro dos carbonetos de tungstênio de revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052.

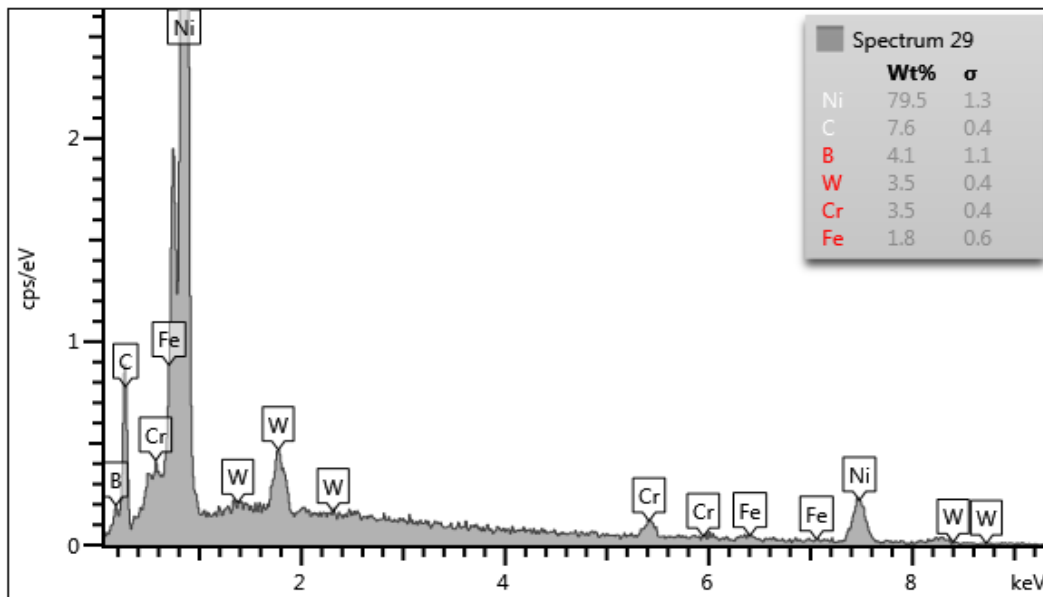


Figura C.11. Espectro da matriz de revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052.

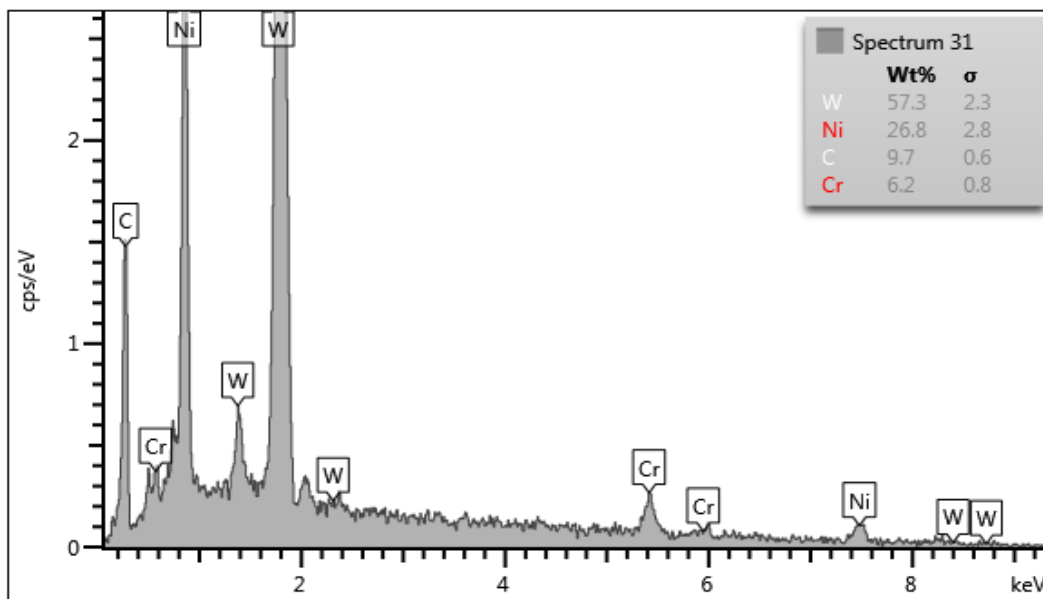
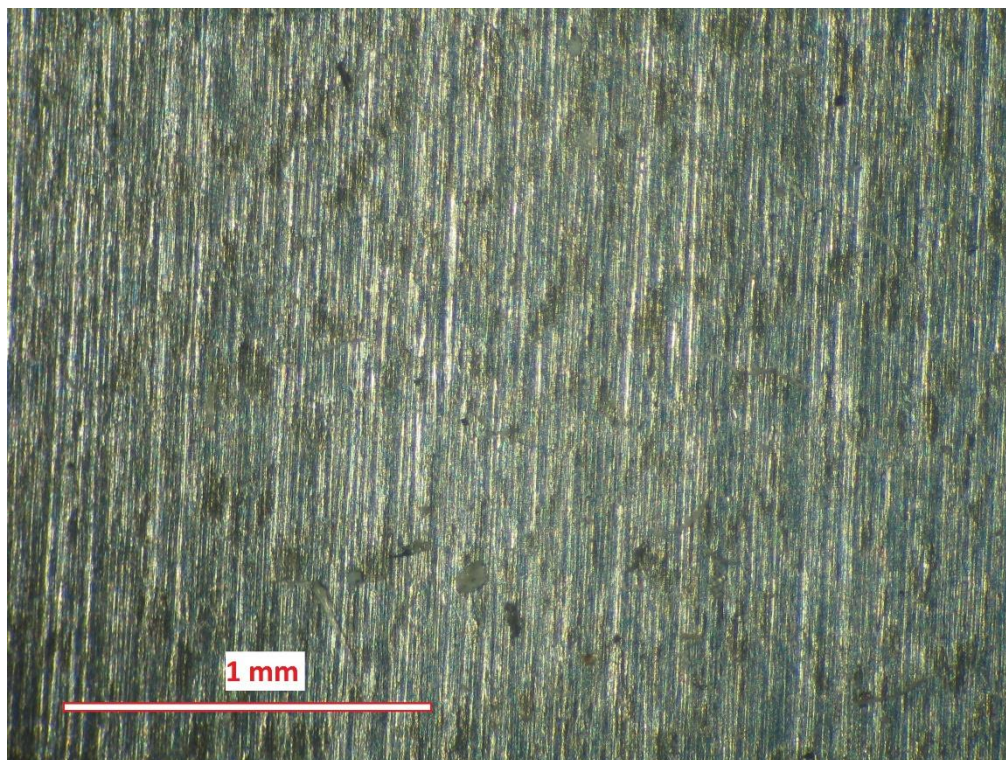


Figura C.12. Espectro dos fragmentos de carbonetos de tungstênio de revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 52052.

## APÊNDICE D



**Figura D.1.** Superfície de revestimentos obtidos com pós novos de MetcoClad™ 6.

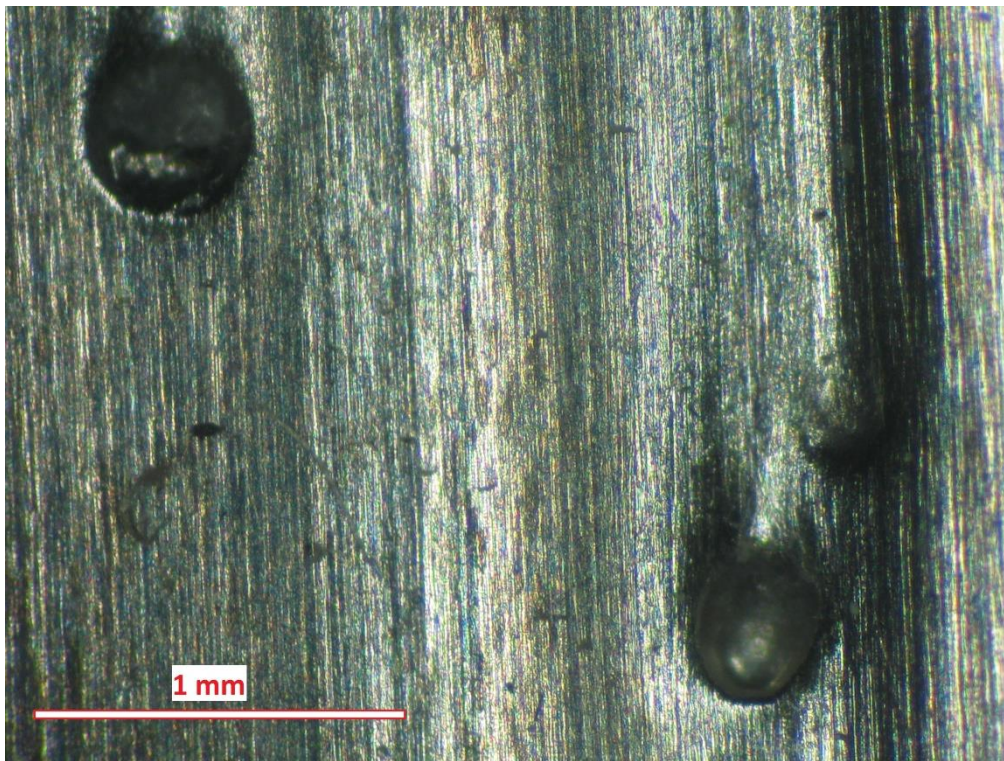


Figura D.2. Poros em revestimentos obtidos com pós reutilizados uma vez de MetcoClad™ 6.



Figura D.3. Poros em revestimentos obtidos com pós reutilizados duas vezes de MetcoClad™ 6.