



Aumento da vida útil das ferramentas de cravação de terminais elétricos para a indústria automóvel

HUGO MIGUEL BANDEIRA LEMOS

novembro de 2022

AUMENTO DA VIDA ÚTIL DAS FERRAMENTAS DE CRAVAÇÃO DE TERMINAIS ELÉTRICOS PARA A INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

Hugo Miguel Bandeira Lemos

1161157

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



AUMENTO DA VIDA ÚTIL DAS FERRAMENTAS DE CRAVAÇÃO DE TERMINAIS ELÉTRICOS PARA A INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

Hugo Miguel Bandeira Lemos

1161157

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação de Francisco José Gomes da Silva.

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Armando José Vilaça de Campos

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Coordenador com Agregação, ISEP

Arguente

Doutora Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte

Professor Auxiliar, FEUP

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a toda a equipa da Ricardo & Barbosa pela forma que me acolheram e por terem dado todo o suporte necessário. Dentro da Ricardo & Barbosa, gostaria de agradecer em particular ao Engenheiro Miguel Oliveira, por me integrar no projeto que constitui a minha dissertação e por todo o acompanhamento. Agradeço ainda ao meu “mestre”, o Engenheiro Fernando Campos, pela enorme quantidade de conhecimento que me transmite e por toda a sua atenção.

A toda equipa do INEGI, destacando o Engenheiro Rui Pedro Silva e o Engenheiro Rui Neto, por todo o suporte ao longo do projeto, esclarecimento de dúvidas e realização de todas as caracterizações efetuadas ao longo deste trabalho prático.

Ao orientador Doutor Raul Campilho, pelo incansável apoio durante o desenvolvimento deste trabalho e ao Doutor Francisco Silva, pelo esclarecimento de todas as dúvidas e disponibilização de material.

Aos meus amigos, por todo o apoio, motivação e companhia durante a realização deste trabalho.

À minha família, com uma atenção especial para os meus pais, por nunca terem deixado de me apoiar e pelo esforço que fazem para garantirem que nunca me falte nada.

PALAVRAS-CHAVE

Indústria Automóvel; Cablagem; Cravação; Seleção de Materiais; Revestimentos Avançados; Vida Útil de Ferramentas; Metodologia *Design Science Research*.

RESUMO

Na Indústria Automóvel, e em todas as outras indústrias ligadas a esta, sente-se cada vez mais, um aumento da competitividade e da obrigatoriedade de cumprir requisitos a nível ambiental. Tendo isto em conta, os esforços para aumentar o tempo de vida útil dos seus produtos são maiores do que nunca.

A presente dissertação foi desenvolvida em torno desta necessidade real, procurando reunir informação que permita obter um aumento do tempo de vida útil dos punções de cravação de terminais elétricos para a Indústria Automóvel. O processo para atingir o objetivo do trabalho prático iniciou-se pela recolha de amostras dos principais concorrentes da Ricardo & Barbosa no mercado, de modo a ser possível fazer uma análise e caracterização das mesmas. Posteriormente, realizaram-se sessões de *brainstorming*, onde se definiu que amostras alternativas se iriam produzir, analisar e caracterizar. Mais tarde, foram produzidas novas ferramentas de cravação em diferentes etapas da produção, de forma a estudar a importância e impacto das etapas de acabamento do processo produtivo. Finalmente, foram produzidas novas amostras, colocadas em teste num cliente da R&B e realizados ensaios de caracterização avançados, o que permitiu uma melhor compreensão da evolução do desgaste das ferramentas durante o seu tempo de vida útil.

Em suma, a presente dissertação contribuiu para uma melhor clarificação do tempo de vida útil das ferramentas de cravação da R&B, possibilitando identificar potenciais indícios de desgaste e, conseqüentemente, garantir uma melhor qualidade dos seus punções de cravação.

KEYWORDS

Automotive Industry; Wire Harness; Crimping; Materials Selection; Advanced Coatings; Tool Lifespan; Design Science Research Methodology.

ABSTRACT

In the Automotive Industry, and in all other industries linked to it, an increase in competitiveness and the obligation to comply with environmental requirements is increasingly felt. Efforts to increase the lifespan of the products are greater than ever.

This dissertation was developed around this real need, seeking to gather information that allows an increase in the lifespan of electrical terminal crimping tools for the Automotive Industry. The process to achieve the objective of the practical work began with the collection of samples from the main competitors of Ricardo & Barbosa in the market, to be able to analyze and characterize them. Subsequently, brainstorming sessions were carried out, where it was defined which alternative samples would be produced, analyzed, and characterized. Later, new crimping tools were produced at different stages of production, to study the importance and impact of the finishing stages of the production process. Finally, new samples were produced, put to the test at an R&B customer and advanced characterization tests were done, which allowed a better understanding of the evolution of tool wear during its lifetime.

In conclusion, the present dissertation contributed to a better clarification of the lifespan of R&B's crimping tools, making it possible to identify potential signs of wear and, consequently, guarantee a better quality of their crimping punches.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

ABS	<i>Antilock Braking System</i>
ACAP	Associação Automóvel de Portugal
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al	Alumínio
AlCrN	Nitreto de cromo-alumínio
As	Arsénio
ASQ	<i>American Society for Quality</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B	Boro
C	Carbono
CAE	Classificação das Atividades Económicas
CMM	<i>Coordinate Measurement Machine</i>
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>
Co	Cobalto
Cr	Crómio
CrN	Nitreto de cromo
CSN	<i>Czech State Norm</i>
Cu	Cobre
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>

DLC	<i>Diamond-like Carbon</i>
DSR	<i>Design Science Research</i>
EAQF	<i>European Art Quilt Foundation</i>
EDS	<i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i>
ESP	<i>Electronic Stability Program</i>
Fe	Ferro
HIT	<i>Indentation Hardness</i>
I&I	Investigação e Inovação
IATF	<i>International Automotive Task Force</i>
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
Mn	Manganês
Mo	Molibdénio
MPCVD	<i>Microwave Plasma Chemical Vapour Deposition</i>
N	Azoto
Ni	Níquel
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
OICA	Organização Internacional dos Construtores de Automóveis
P	Fósforo
Pb	Chumbo
PIB	Produto Interno Bruto

PPAP	Processo de Aprovação de Peças de Produção
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
PVP	Preço de Venda ao Público
QS	<i>Quality System</i>
R&B	Ricardo&Barbosa Lda.
S	Enxofre
Se	Selénio
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
Si	Silício
TCS	<i>Traction Control System</i>
Ti	Titânio
TiAlN	Nitreto de alumínio-titânio
TiCN	Carbo-nitreto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
V	Vanádio
VDA	<i>Verband der Automobilindustrie</i>
W	Tungsténio
WC/C	Mistura de metal e carbono tipo diamante

Lista de Unidades

€	Euro
°C	Grau Celsius
GPa	GigaPascal

HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
kg	Quilograma
m ²	Metro quadrado
mm	Milímetro
mm/s	Milímetro por segundo
μm	Micrómetro

Lista de Símbolos

%	Porcentagem
%wt	Peso percentual
Ra	Desvio médio aritmético do perfil
Rz	Média das alturas máximas do perfil de rugosidade

GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Benchmarking</i>	Processo de comparação de produtos/serviços de diferentes empresas
<i>Bottleneck</i>	Ponto de estrangulamento
<i>Brainstorming</i>	Tempestade de ideias
<i>Crimpers</i>	Ferramentas de cravação
<i>Crimping dies</i>	Ferramentas de cravação
<i>Display</i>	Dispositivo para a apresentação de informação, de modo visual e/ou táctil
<i>End Feed</i>	Alimentação frontal
<i>Insourcing</i>	Realizar os serviços da empresa internamente
<i>Jacks</i>	Conectores com extremidade fêmea
<i>Just-In-Time</i>	Sistema de produção que determina que tudo deve ser produzido, transportado ou comprado no momento certo
<i>Lead time</i>	Tempo decorrido desde que uma ordem de pedido é gerada ao fornecedor até que a mercadoria, desse fornecedor, é entregue ao cliente
<i>Micro-cut</i>	Corte realizado na zona de cravação do terminal para verificação da qualidade
<i>Outsourcing</i>	Recorrer a outras empresas para obter os componentes necessários ao fabrico/montagem dos produtos finais
<i>Plugs</i>	Conectores com extremidade macho
<i>Pull force</i>	Teste de tração do cabo condutor

<i>Shot peening</i>	Tratamento superficial que consiste na projeção de microesferas sobre a superfície, o que leva ao aumento da resistência à fadiga dos componentes
<i>Side Feed</i>	Alimentação lateral
<i>Sputtering</i>	Projeção catódica
<i>Stock</i>	Quantidade de mercadorias armazenadas para determinado fim

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Linha de Montagem Ford T (Maná e.d.i., 2012)	9
Figura 2 - Sequência de fabrico de um automóvel (adaptado de Vieira, 2020)	10
Figura 3 - Evolução histórica da indústria automóvel nacional (AFIA, 2020)	12
Figura 4 - CAE's das empresas produtoras de componentes para automóveis (Vale et al., 2013)	14
Figura 5 - Peso da indústria de componentes para automóveis na economia nacional (AFIA, 2021)	14
Figura 6 - Volume de Negócios por Atividade (AFIA, 2021)	15
Figura 7 - Volume de negócios e Volume de exportações da indústria de componentes automóveis (AFIA, 2021)	15
Figura 8 - Destino de Exportações a partir de Portugal (% exportações) (AFIA, 2021)	16
Figura 9 - Parâmetros que fazem parte do PPAP (adaptado de AIAG, 2006)	20
Figura 10 - Exemplos de cablagem utilizada no automóvel (Yazaki, 2019)	20
Figura 11 - Conectores e terminais elétricos (TE, 2022)	21
Figura 12 - Diferentes tipos de condutores elétricos (CableCraft, 2019)	21
Figura 13 - - Yazaki e os seus colaboradores na Ogu Factory (Yazaki, 2021)	22
Figura 14 - Distribuição de vendas líquidas no ano fiscal de 2021 por região (Yazaki, 2021)	22
Figura 15 - Distribuição do mercado de cablagens entre os maiores fabricantes no ano de 2010 (RIC, 2010)	23
Figura 16 - Ferramentas de cravação manual (TE, 2019)	24
Figura 17- Representação dos diferentes tipos de alimentação dos aplicadores (Castro et al., 2017)	24
Figura 18 - Terminal de cravação frontal e terminal de cravação lateral (adaptado de CasaDoAutoElétrico, 2022)	25
Figura 19- Componentes de um aplicador de alimentação frontal (TE, 2022)	25
Figura 20 - Diferentes setores de um terminal elétrico (Castro et al., 2017)	26
Figura 21 - Descrição gráfica do processo de cravação (adaptado de Silva et al., 2020)	26
Figura 22 - Exemplos de deformações dos terminais (adaptado de TE, 2019)	27
Figura 23- <i>Micro-cut</i> de uma cravação com força reduzida (adaptado de TE, 2019)	27
Figura 24- <i>Micro-cut</i> de uma cravação com força excessiva (adaptado de TE, 2019)	27

Figura 25- <i>Micro-cut</i> de uma cravação com fios demasiado largos para o terminal escolhido (adaptado de TE, 2019)	28
Figura 26 - <i>Micro-cut</i> de uma cravação com fios demasiado finos (adaptado de TE, 2019)	28
Figura 27- <i>Micro-cut</i> de uma cravação com alimentação do terminal desajustada (adaptado de TE, 2019)	28
Figura 28 - <i>Micro-cut</i> de uma cravação feita com os <i>crimpers</i> desalinados (adaptado de TE, 2019)	28
Figura 29- Custo e severidade de cravações mal efetuadas (adaptado de TE, 2019)	29
Figura 30 - <i>Micro-cut</i> de uma cravação bem efetuada (adaptado de TE, 2019)	30
Figura 31 - Diagrama esquemático abreviado de algumas variantes do processo PVD (Holmberg et al., 2000)	36
Figura 32 - Diagrama dos métodos de revestimento PVD de evaporação e de projeção catódica (Silva, 2001)	37
Figura 33 - Representação esquemática do processo de <i>shot peening</i> (Maawad et al., 2010)	39
Figura 34 - Exemplos de produtos produzidos pela R&B - a) Peças feitas por encomenda; b) projetos feitos por encomenda; c) Aplicador de marca R&B (R&B, 2022).....	47
Figura 35 - Instalações atuais da R&B - a) Instalação de Portugal; b) Instalação do México (R&B, 2022) .	48
Figura 36 - Distribuição das vendas em 2018 - a) Vendas por indústria; b) Distribuição das vendas por indústria da mecânica de precisão; c) Distribuição das vendas por indústria da cablagem (R&B, 2022)	49
Figura 37 - Números chave do INEGI em 2021 (INEGI, 2022)	50
Figura 38 - Ferramentas de cravação atuais da Ricardo & Barbosa montadas num aplicador	52
Figura 39 - Centro de maquinagem CNC da R&B	53
Figura 40 - Retificadora plana da R&B.....	54
Figura 41- Centro de erosão de fio da R&B	55
Figura 42 - Interior de um centro de erosão a fio	55
Figura 43 - Características das microesferas de vidro usadas pela R&B: a) Propriedades físicas; b) Composição química (Graphite, 2017).....	56
Figura 44 - Jato de areia da R&B.....	56
Figura 45 - Zona funcional de um punção de cravação	57
Figura 46 - Punção de cravação e o seu desenho técnico	57
Figura 47 - Brainstorming de análise e implementação de ideias	59

Figura 48 - Identificação dos cortes realizados nas amostras para análise: corte A – zona útil das ferramentas; corte B – zona não útil.	62
Figura 49 - Resultados da medição das durezas (HV1) do material base das amostras.....	68
Figura 50 - Caracterização metalográfica realizada à amostra 1: a) visualização em microscópio ótico da camada de revestimento; b) análise SEM da camada de revestimento; c) espectro EDS obtido para o revestimento.....	69
Figura 51 - Caracterização metalográfica realizada à amostra 2: a) visualização em microscópio ótico; b) análise SEM.....	69
Figura 52 - Caracterização metalográfica realizada à amostra 3: a) visualização em microscópio ótico; b) análise SEM.....	70
Figura 53 - Caracterização metalográfica realizada à amostra 4: a) visualização em microscópio ótico da camada de revestimento; b) análise SEM da camada de revestimento; c) espectro EDS obtido para o revestimento.....	70
Figura 54 - Caracterização metalográfica realizada à amostra 5: a) visualização da superfície em microscópio ótico; b) análise SEM da zona funcional.....	71
Figura 55 - Visualização em microscópio ótico da camada de revestimento das ferramentas de cravação 6 e 7: a) amostra 6 – zona funcional; b) amostra 6 – zona não útil; c) amostra 7 – zona funcional; d) amostra 7 – zona não útil.	72
Figura 56 - Análise SEM-EDS executada à amostra 6 (zona funcional): a) visualização SEM da camada de revestimento e respetiva espessura; b) espectro EDS obtido para o revestimento.....	72
Figura 57 - Caracterização metalográfica efetuada à ferramenta de cravação nº 8: a) visualização em microscópio ótico; b) análise SEM da zona funcional.....	73
Figura 58 - Visualização em microscópio ótico da camada de revestimento da ferramenta de cravação nº 9: a) zona funcional; b) zona não funcional.	73
Figura 59 - Análise SEM-EDS executada à amostra 9 (zona funcional): a) visualização da espessura da camada de revestimento – zona 1; b) determinação da espessura da camada de revestimento – zona 2; c) espectro EDS obtido para o revestimento.....	74
Figura 60 - Caracterização metalográfica efetuada à ferramenta de cravação nº 10: a) visualização da superfície em microscópio ótico; b) análise SEM da zona funcional.	75
Figura 61 - Caracterização metalográfica efetuada à ferramenta de cravação nº 12: a) visualização da superfície em microscópio ótico; b) análise SEM da zona funcional.	75
Figura 62 - Caracterização metalográfica executada à ferramenta de cravação nº 13: a) análise SEM da superfície da amostra (zona funcional); b) visualização em microscópio ótico; c) análise SEM da superfície da amostra (zona funcional) desgastada; d) espectro EDS	76

Figura 63 - Caracterização metalográfica realizada à ferramenta de cravação nº 14: a) visualização da superfície da amostra por microscopia ótica; b) análise SEM da superfície da amostra (zona funcional); c) espectro EDS obtido na superfície desgastada da amostra	77
Figura 64 - Comparação das propriedades de diferentes aços para ferramentas (Hudson, 2022).....	79
Figura 65 - Identificação dos cortes realizados nas amostras submetidas a análise (ferramentas 15 a 22): corte A – zona funcional; corte B – zona não útil.	81
Figura 66 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 15 (zona funcional).....	84
Figura 67 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 16 (zona funcional).....	85
Figura 68 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 17 (zona funcional).....	85
Figura 69 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 18 (zona funcional).....	86
Figura 70 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 19 (zona funcional).....	86
Figura 71 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 20 (zona funcional).....	86
Figura 72 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 21 (zona funcional).....	87
Figura 73 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 22 (zona funcional).....	87
Figura 74 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra nº 17 sem montagem metalográfica: a) imagem SEM da amostra; b) espectro EDS referente à zona contaminada (Z1); c) espectro EDS relativo ao material base (Z2).	88
Figura 75 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra nº 18 sem montagem metalográfica: a) imagem SEM da amostra; b) espectro EDS referente à zona contaminada (Z1); c) espectro EDS relativo ao material base (Z2).	89
Figura 76 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra nº 19 sem montagem metalográfica: a) imagem SEM da amostra; b) espectro EDS referente à zona contaminada (Z1); c) espectro EDS relativo ao material base, mas ainda com contaminação (Z2).	90
Figura 77 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra nº 20 sem montagem metalográfica: a) imagem SEM da amostra; b) espectro EDS referente à zona contaminada mais oxidada (Z1); c) espectro EDS referente à zona contaminada menos oxidada (Z2); d) espectro EDS relativo ao material base (Z3).	90
Figura 78 - Resultados da medição da rugosidade superficial – desvio médio aritmético do perfil, Ra. ...	91
Figura 79 - Resultados da medição da média das alturas máximas do perfil de rugosidade, Rz.	92
Figura 80 - Resultados da medição das durezas (HV1) do material base das amostras.....	92
Figura 81 - Identificação dos cortes realizados e respetivas amostras extraídas da ferramenta de cravação nº 23: lado 23A – 500.000 ciclos de utilização; lado 23B – 30.000 ciclos de utilização.....	97
Figura 82 - Análise SEM realizada à superfície de cravação da amostra 23A1.....	98

Figura 83 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra 23A1: a) identificação de zonas com material base visível; b) análise SEM-EDS na zona de arrasto de material; c) espectro EDS obtido para o material base (Z4); d) Espectro EDS – partícula de estanho (Z1); e) Espectro EDS obtido para o revestimento de crómio (Z2).....	98
Figura 84 - Continuação da análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra 23A1: a) presença de fissuração da camada de revestimento na zona de “arrasto” de material; b) espectro EDS na zona de fissuração.	99
Figura 85 - Análise SEM realizada à superfície de cravação da amostra 23A2.....	99
Figura 86 - Análise SEM realizada à superfície de cravação da amostra 23B1.....	100
Figura 87 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra 23B1: a) identificação de zonas de riscos e material base visível; b) análise SEM-EDS na zona dos riscos; c) espectro EDS – material base visível (Z1); d) espectro EDS – revestimento de crómio pouco espesso (Z2).....	101
Figura 88 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra 23B2: a) e b) análise SEM; c) análise SEM-EDS à camada de revestimento; d) espectro EDS – revestimento de crómio (Z1).....	101
Figura 89 - Caracterização metalográfica (análise SEM) realizada à amostra 23A1: a) presença de revestimento na periferia da superfície de cravação; b) espessura do revestimento na periferia da superfície de cravação; c) resíduos/ ausência de revestimento no centro da superfície de cravação; d) espessura do revestimento no centro da superfície de cravação; e) cavidades na superfície de cravação; f) fissura do material base na zona funcional.....	102
Figura 90 - Caracterização metalográfica (análise SEM) realizada à amostra 23A2: fragmentação e ausência de revestimento: a) e b) análise da zona 1; c) análise da zona 2; d) espessura do revestimento na zona fragmentada.....	103
Figura 91 - Caracterização metalográfica (análise SEM) realizada à amostra 23B1: a) espessura de revestimento fora da superfície de cravação; b) revestimento contínuo na periferia da superfície de cravação; c) espessura de revestimento na periferia da superfície de cravação; d) espessura de revestimento no centro da superfície de cravação; e) cavidade na superfície de cravação; f) partícula de estanho (Sn) alojada numa cavidade na superfície de cravação.	105
Figura 92 - Caracterização metalográfica (análise SEM) realizada à amostra 23B2: a) superfície de cravação; b) fissuração do material base e do revestimento na superfície de cravação; c) fragmentação do revestimento; d) espessura do revestimento na zona de fragmentação.....	106
Figura 93 - Resultados da medição das durezas (HV1) das amostras da ferramenta 23.	107
Figura 94 - Comparação da uniformidade da camada de revestimento por análise SEM: a) amostra nº 1 (crómio-duro; b) amostra nº 4 (revestimento de TiN por processo PVD).	109
Figura 95 - Comparação da uniformidade da camada superficial lateral dos punções através de análise SEM: a) amostra nº18 (após jato de areia); b) amostra nº19 (saída de eletroerosão).....	110
Figura 96 - Composição química normalizada do aço CSN 41 9569 (BBN, 2022).....	133

Figura 97 - Composição química normalizada do aço CSN 41 9312 (CNI, 2022)	133
Figura 98 - Composição química normalizada do aço AISI S7 (GRANTA, 2020)	133
Figura 99 - Composição química normalizada do aço AISI H13 (GRANTA, 2020).....	133
Figura 100 - Composição química normalizada do aço AISI 420 (GRANTA, 2020)	133
Figura 101 - Composição química normalizada do aço UNE 55NiCr12 (Seeel Grades, 2022)	134
Figura 102 - Composição química normalizada do aço AISI A2 (GRANTA, 2020)	134
Figura 103 - Composição química normalizada do aço AISI 5150 (GRANTA, 2020)	134
Figura 104 - Composição química normalizada do aço AISI D2 (GRANTA, 2020).....	134

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de veículos produzidos a nível mundial em 2020 (adaptado de OICA, 2020).....	11
Tabela 2 - Resumo por fábricas dos automóveis produzidos em Portugal em 2020/2021 (adaptado de ACAP, 2022)	12
Tabela 3 - Principais benefícios da Certificação IATF 16949:2016 (adaptado de APCER, 2022)	17
Tabela 4- Efeito dos elementos de liga nos aços (Soares, 2005)	31
Tabela 5 - Composição química típica do aço AISI S7 (Bohler, 2013)	33
Tabela 6 - Tratamentos de superfície – revestimentos usualmente aplicados aos componentes mais solicitados (Oerlikon, 2022)	38
Tabela 7 - Estado de arte - Tratamentos e revestimentos superficiais	40
Tabela 8 - Número de máquinas em cada uma das instalações da R&B.....	48
Tabela 9 - Descrição de cada etapa da metodologia DSR (Sousa et al., 2022)	51
Tabela 10 - Identificação das amostras submetidas a análise.....	61
Tabela 11 - Composição química obtida para o material base das amostras analisadas.....	63
Tabela 12 - Quadro-resumo das características das ferramentas de cravação submetidas a análise.	78
Tabela 13 - Identificação das amostras submetidas a análise (ferramentas 15 a 22).....	80
Tabela 14 - Composições químicas obtidas para os materiais base das amostras recolhidas	82
Tabela 15 - Quadro-resumo das características das ferramentas de cravação, em diferentes etapas do processo produtivo, submetidas a análise.....	93
Tabela 16 - Identificação das ferramentas com ciclos de utilização submetidas a análise.	96
Tabela 17 - Composição química obtida para o material base da amostra 23.....	97
Tabela 18 - Quadro-resumo das características das ferramentas de cravação sujeitas a ciclos de utilização distintos.	107
Tabela 19 - Análise do retorno de investimento para dois casos de estudo.....	111
Tabela 20 - Análise ao cumprimento dos objetivos propostos	116

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodologia	4
1.4	Estrutura do relatório.....	4
1.5	Local/Empresa de acolhimento.....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Indústria automóvel no mundo e em Portugal.....	9
2.1.1	Indústria Automóvel Global	9
2.1.2	Indústria Automóvel Nacional.....	11
2.1.3	Indústria de componentes automóveis.....	13
2.1.4	Requisitos principais na indústria automóvel	16
2.1.4.1	Qualidade.....	16
2.1.4.2	Flexibilidade	18
2.1.4.3	Prazo de entrega.....	19
2.2	Cablagem automóvel	20
2.2.1	Enquadramento e características.....	20
2.2.2	Mercado de cablagens	22
2.2.3	Ferramentas de cravação existentes.....	23
2.2.4	Descrição do processo de cravação de terminais elétricos.....	25
2.2.5	Principais problemas na cravação de cablagens	26
2.3	Materiais, tratamentos e revestimentos superficiais utilizados nas ferramentas de cravação	30
2.3.1	Visão geral dos materiais.....	30

2.3.2	Aços utilizados nas ferramentas de cravação	33
2.3.3	Tratamentos e revestimentos superficiais	34
2.3.3.1	Cromagem.....	34
2.3.3.2	Revestimentos PVD.....	35
2.3.3.2.1	Técnica de deposição PVD	35
2.3.3.2.2	Diferentes materiais utilizados nos revestimentos PVD	38
2.3.3.3	Shot peening.....	39
2.3.3.4	Estado da arte.....	39
3	DESENVOLVIMENTO.....	47
3.1	Caracterização das entidades envolvidas	47
3.1.1	Entidade acolhedora	47
3.1.2	Entidade parceira	49
3.2	Abordagem ao trabalho a realizar	51
3.2.1	Metodologia utilizada.....	51
3.2.2	Caracterização do processo atual.....	52
3.2.3	Identificação de problemas e possíveis melhorias.....	57
3.2.4	Objetivos	58
3.2.5	Brainstorming.....	58
3.3	Análise de <i>benchmarking</i> de ferramentas de cravação.....	60
3.3.1	Procedimento experimental.....	60
3.3.2	Análise de resultados	62
3.3.2.1	Análise química	62
3.3.2.2	Determinação da dureza.....	67
3.3.2.3	Análise Metalográfica (Microscopia Ótica e SEM-EDS).....	68
3.3.3	Conclusões - Análise de benchmarking de ferramentas de cravação	78
3.4	Caracterização de ferramentas de cravação em diferentes etapas do processo produtivo.....	80
3.4.1	Procedimento experimental.....	80

3.4.2	Análise de resultados	82
3.4.2.1	Análise química	82
3.4.2.2	Análise SEM-EDS	84
3.4.2.3	Determinação da rugosidade superficial	91
3.4.2.4	Determinação da dureza.....	92
3.4.3	Conclusões – Caracterização de ferramentas em diferentes etapas do processo produtivo .	93
3.5	Caracterização de ferramentas de cravação sujeitas a ciclos de utilização.....	94
3.5.1	Procedimento experimental.....	94
3.5.2	Análise de resultados	97
3.5.2.1	Análise química	97
3.5.2.2	Análise SEM-EDS	97
3.5.2.3	Determinação da dureza.....	106
3.5.3	Conclusões – Caracterização de Ferramentas Sujeitas a Ciclos de Utilização	107
3.6	Discussão de resultados	108
3.6.1	Quantificação de melhorias.....	108
3.6.2	Proposta final adotada	110
3.6.3	Análise de custos	111
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	115
4.1	Conclusões	115
4.2	Proposta de trabalhos futuros	118
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	121
6	ANEXOS.....	133
6.1	Anexo 1 - Composições Químicas Normalizadas dos Aços	133

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Metodologia
- 1.4 Estrutura do relatório
- 1.5 Local/Empresa de acolhimento

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A indústria automóvel é cada vez mais caracterizada pela sua elevada competitividade e pela procura contínua de aumento de produtividade e qualidade. Por outro lado, os requisitos a nível ambiental do setor em que a Ricardo & Barbosa, LDA (R&B) se insere, e também dos setores com que esta se relaciona, exigem que os esforços de investigação e inovação (I&I) sejam um fator crítico para a evolução nestes segmentos.

A forma mais lógica das empresas satisfazerem tanto a vertente competitiva, como ambiental, é a produção de componentes com melhor qualidade e durabilidade. As preocupações relacionadas com a durabilidade dos produtos são generalizadas a nível do tecido industrial mundial, sobretudo nas indústrias de alta tecnologia. Recentemente, a Comissão Europeia propôs duplicar a taxa de aumento da produtividade dos recursos até 2030 (COM, 2019). Este modelo não implica apenas a lógica de reutilização, mas também a utilização eficiente dos recursos e com impacto na durabilidade dos mesmos.

Os automóveis atuais possuem milhares de terminais elétricos, e com a crescente eletrificação do setor automóvel, estes números tendem a aumentar. Estes factos sustentam a importância de investigações e desenvolvimentos no sentido de aumentar a durabilidade das ferramentas usadas para a cravação de terminais elétricos. A cravação de terminais elétricos, apesar de ser um processo que ocorre em grande escala, é uma operação minuciosa e com bastantes requisitos estipulados pelos fabricantes de automóveis. Posto isto, na tentativa de aumentar a durabilidade das ferramentas de cravação é muito importante garantir que estas mantêm as suas propriedades mecânicas e geométricas até ao seu fim de ciclo, caso contrário poderá resultar numa cravação defeituosa.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo o aumento da vida útil das ferramentas de cravação para a indústria automóvel. De modo a atingir este objetivo é necessário satisfazer os seguintes pontos:

- Seleção de materiais, tratamentos térmicos e revestimentos economicamente e funcionalmente fiáveis para ferramentas de cravação;

- Identificação e resolução de problemas identificados nas ferramentas de cravação atualmente produzidas;
- Obtenção de um produto com qualidade superior ao atualmente produzido e com uma relação de custo/benefício justificativo para os clientes da R&B.

1.3 Metodologia

A elaboração do presente trabalho seguiu a metodologia DSR, que seguidamente se descreve:

- **Identificação do problema** - Análise do processo atual, descrição das suas limitações e aspetos a melhorar;
- **Definir objetivos para a solução** - Definir vários objetivos/requisitos para a solução dos problemas anteriormente identificados;
- **Design e desenvolvimento** - Escolha de novas soluções, com base nos objetivos e requisitos anteriormente definidos;
- **Demonstração da solução** - Implementação da solução desenvolvida;
- **Avaliação da solução** - Avaliar o desempenho da solução implementada, verificando se os objetivos/requisitos são cumpridos;
- **Conclusões** - Avaliação final da solução, através da comparação entre a nova solução implementada e o processo anterior.

1.4 Estrutura do relatório

A presente dissertação encontra-se organizada em quatro capítulos:

- **Introdução** – Contextualiza-se o tema desenvolvido e são expostos os principais objetivos do trabalho;
- **Revisão bibliográfica** – Abordam-se os temas teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho prático. Inicialmente analisa-se a indústria automóvel e os seus principais requisitos. Seguidamente, descreve-se o conceito de cablagem automóvel, onde tópicos como ferramentas de cravação, processos de cravação e principais problemas do mesmo são estudados. No final deste capítulo, são explorados os materiais e revestimentos superficiais;
- **Desenvolvimento** – Analisa-se e caracteriza-se o processo atual, assim como várias amostras e possíveis alternativas ao mesmo, de modo a reunir informação e resultados que permitam atingir o objetivo do trabalho prático;
- **Conclusões** – Apresentam-se as conclusões dos resultados obtidos no trabalho realizado e descrevem-se os benefícios que este trouxe para o autor e para a empresa. No final deste capítulo, são ainda expostas propostas de trabalhos futuros.

1.5 Local/Empresa de acolhimento

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado de Engenharia Mecânica, no ramo de Gestão Industrial, do Instituto Superior de Engenharia do Porto. A empresa de acolhimento foi a Ricardo & Barbosa, LDA., sediada em São Pedro da Cova, Gondomar. Contou-se ainda com a parceria do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, sediado no Porto.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Indústria automóvel no mundo e em Portugal
- 2.2 Cablagem automóvel
- 2.3 Materiais, tratamentos e revestimentos superficiais utilizados nas ferramentas de cravação

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indústria automóvel no mundo e em Portugal

2.1.1 Indústria Automóvel Global

A indústria automóvel surgiu no final do século XIX, mais precisamente no ano de 1880. Inicialmente, nesta indústria, a produção era feita de um modo artesanal, oferecendo ao cliente a hipótese de adquirir um automóvel com características específicas. Por outro lado, este método de produção possuía tempos e custos bastante elevados (Womack et al., 1990). Aquando da 1ª revolução industrial, todo o trabalho feito artesanalmente foi substituído por máquinas. Entre os muitos fabricantes de automóveis, Henry Ford concebeu a sua primeira linha de montagem em 1913 e, assim, revolucionou todos os processos de produção envolvidos do seu modelo T (Figura 1).

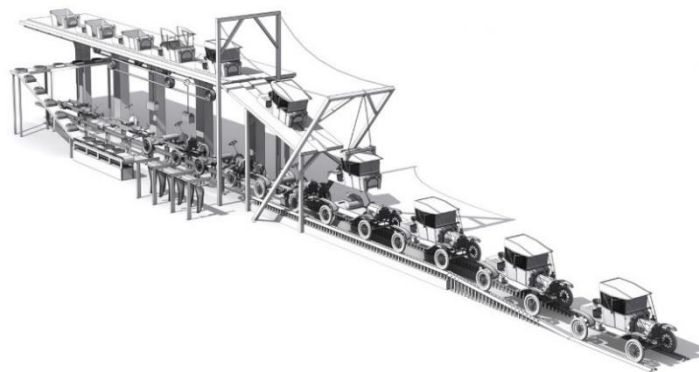


Figura 1 - Linha de Montagem Ford T (Maná e.d.i., 2012)

Esta linha de produção tornou-se um modelo para todos os métodos de produção até aos dias de hoje. Ao contrário do que acontecia na altura em que Ford criou a sua primeira linha de produção, hoje encontra-se uma enorme variedade de componentes automóveis, que, por consequência, estimula o aparecimento de novas indústrias e cria uma elevada concorrência entre os fabricantes dos mesmos. Atualmente, a indústria automóvel é transversal aos mais variados setores de atividade, desde a indústria têxtil até à indústria metalomecânica, lidando com uma grande variedade de tecnologias, competências e processos organizacionais com vista ao desenvolvimento

e produção de componentes, módulos e sistemas, numa lógica de produto complexo, global e integrado (Selada et al., 2004).

Face a esta abrangência global, a Indústria Automóvel é caracterizada como uma indústria com uma cadeia de valor complexa, quer a nível organizacional como tecnológico, seguindo um trajeto que tem início na matéria-prima, passando pelos fornecedores, até terminar no consumidor final (Araújo et al., 2017; INTELI, 2005). De acordo com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), a Indústria Automóvel é um setor de média alta intensidade tecnológica, instigador de novas dinâmicas de produtividade e competitividade (Hatzichronoglou, 1997). Na Figura 2 está ilustrado um esquema que mostra sucintamente como se processa o fabrico de um modelo automóvel desde as matérias-primas mais básicas (como aço, borracha, compósitos, entre outros) até ao produto final entregue ao consumidor.

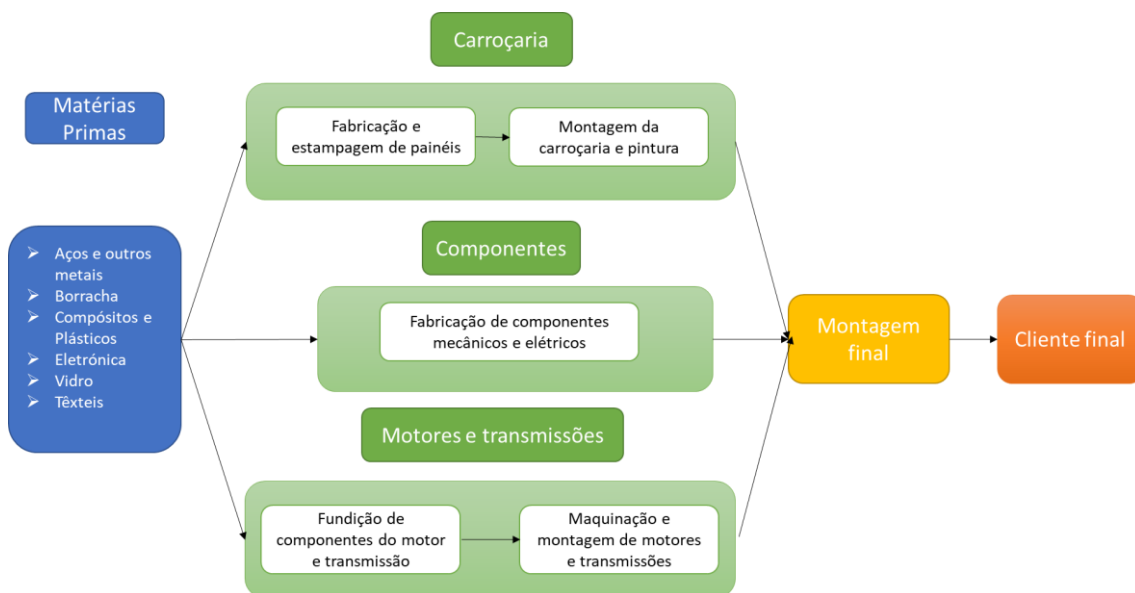


Figura 2 - Sequência de fabrico de um automóvel (adaptado de Vieira, 2020)

A Indústria Automóvel está intrinsecamente conectada à vitalidade das economias e, por sua vez, a evolução destas terá influência direta nas vendas e na produção de veículos, ou seja, afetará fortemente toda a indústria. Com implicações no emprego e na atividade económica, a produção de automóveis gera uma procura significativa de inputs intermédios que vão incitar e potenciar outros setores da economia (Velooso et al., 2000). Segundo dados da Organização Internacional dos Construtores de Automóveis (OICA), registaram-se no setor da produção/montagem de veículos, para o ano de 2020, os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade de veículos produzidos a nível mundial em 2020 (adaptado de OICA, 2020)

Categoria de Veículos	Unidades
Passageiros	55 834 456
Comerciais	21 787 126
Total	77 621 582

A Indústria Automóvel promove a interligação de setores como eletrónica, eletricidade, metalomecânica, têxtil e uma multiplicidade de tecnologias de tal forma vasta, que a citação de Drucker (1946) caracteriza da melhor maneira a sua transcendência. “A indústria automóvel é a indústria das indústrias.”

2.1.2 Indústria Automóvel Nacional

A nível nacional, o primeiro contacto com a indústria global automóvel surgiu na década de 60. Nessa altura, investiu-se na qualificação, aprendizagem tecnológica e organizacional, atraindo assim os primeiros investimentos estrangeiros. Alguns anos depois, já nas décadas de 80 e 90, nasceram as primeiras empresas de grande dimensão à escala europeia, com os projetos da Renault e AutoEuropa, em Portugal (AICEP, 2014).

No início da década de 90, o discreto crescimento da indústria foi substituído por uma rápida expansão impulsionada pelo projeto AutoEuropa (INTELI, 2005). A industrialização automóvel foi extremamente positiva para o país, pois daí surgiu uma inovação no domínio de processos e produtos, trocas de tecnologia e conhecimento com outros países mais evoluídos, e um aumento do investimento em investigação e desenvolvimento (Velooso et al., 2000). Desde então, o setor automóvel tem vindo a consolidar competências baseadas na qualidade, competitividade e flexibilidade, fortalecendo capacidades de engenharia e construindo redes de cooperação além-fronteiras. Na Figura 3 é possível observar a evolução histórica da indústria automóvel nacional desde o seu início nos anos 60 até 2020.



Figura 3 - Evolução histórica da indústria automóvel nacional (AFIA, 2020)

Segundo a Associação Automóvel de Portugal (ACAP), o sector Automóvel em Portugal é um dos mais dinâmicos e inovadores da economia nacional. O país conta com cinco grandes construtoras: grupo PSA, Mitsubishi, Caetano Bus, Toyota Caetano e Autoeuropa, sendo a última referida, a maior representante a nível de vendas anuais. Estes valores podem ser consultados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo por fábricas dos automóveis produzidos em Portugal em 2020/2021 (adaptado de ACAP, 2022)

	Unids. 2021	%Total 2021	Unids. 2020	%2021/2020
Total – Geral	289 954	100,0	264 236	9,7
Exportação	282 420	97,4	258 738	9,2
Mercado Interno	7 534	2,6	5 498	37,0
Autoeuropa	210 754	72,7	192 000	9,8
Peugeot Citroen	67 838	23,4	64 659	4,9
Mitsubishi	9 392	3,2	6 051	55,2
Toyota Caetano	1 947	0,7	1 465	32,9
Caetano Bus	23	0,0	61	-62,3

A Indústria Automóvel é constituída por empresas com um perfil altamente tecnológico, com padrões de grande exigência e rigor. Só com estes parâmetros consegue ser reconhecida e fazer a diferença. O sector automóvel tem uma componente tecnológica e técnica elevadíssima, resultante obviamente de todo um trabalho de Investigação e Inovação (I&I) complexo e apurado, que não pode ser dissociado de uma componente emocional e cognitiva relevante, especialmente no que respeita a padrões de beleza, design, ergonomia e funcionalidade (IAPMEI, 2014). Inovar é fundamental, permitindo assim que as empresas possam aceder a novos mercados, aumentem as suas receitas, realizem novas parcerias, adquiram novos conhecimentos e aumentem o valor das suas marcas (AFIA, 2018). O automóvel abarca um sem-número de componentes de distintas áreas.

2.1.3 Indústria de componentes automóveis

A grande evolução de Indústria Automóvel fez com que esta se tornasse numa indústria dependente de outras subindústrias, desde os componentes obtidos através de injeção plástica até aos componentes eletrónicos. Isto deve-se ao facto de que, a determinado momento, o crescente aumento de diversificação nos modelos fabricados necessitou da adoção de uma estratégia diferente para o fabrico dos diferentes modelos, pois uma única empresa não consegue ser capaz de produzir todos os componentes de um automóvel sem que o preço final do automóvel fique elevadíssimo para o cliente final.

De forma a evitar o aumento dos preços finais dos seus produtos, as empresas optaram por fazer *outsourcing* (Cao et al., 2018), sendo que na maioria das marcas automóveis apenas a carroçaria é produzida na própria marca (*insourcing*), enquanto os restantes elementos provêm de outras empresas. O *outsourcing* consiste em recorrer a outras empresas para obter os componentes necessários ao fabrico/montagem dos produtos finais. Por exemplo, os sistemas de distribuição elétrica e os sistemas de *display* são produzidos e montados em empresas exteriores aos OEM (*Original Equipment Manufacturer*). Um exemplo é a Yazaki Saltano Ovar que tem múltiplos setores e linhas de cablagem automóvel para os mais diversos fabricantes. Na Figura 4 pode-se verificar a distribuição das empresas produtoras de componentes automóveis pela Classificação das Atividades Económicas (CAE).

CAE	Descrição	%
293	Partes e acessórios para veículos a motor	44,40%
222	Partes plásticas	12,80%
257	Cutelaria, ferramentas e "hardware" geral	10,00%
221	Produtos de borracha	5,60%
139	Outros têxteis	5,00%
259	Outros produtos fabricados a partir do metal	4,40%
245	Moldagem do metal	2,80%
255	Forjamento, prensagem e estampagem do metal	1,70%
256	Tratamento e revestimento de metais	1,70%
281	Produção de maquinaria e equipamento com propósitos gerais	1,70%
273	Cablagem	1,70%
264	Televisões, rádios e outros bens similares	1,10%
243	Outras actividades de processamento do aço	1,10%
Outros	Outros grupos CAE	6,10%

Figura 4 - CAE's das empresas produtoras de componentes para automóveis (Vale et al., 2013)

Através da análise da Figura 5 verifica-se que a indústria nacional de componentes para a indústria automóvel é constituída por 350 empresas, que empregam 62 000 funcionários e que teve lugar a um aumento de mais de 14 mil postos de trabalho entre 2015 e 2019 (AFIA, 2020). Estes números geraram, em 2020, receitas de 10,4 mil milhões de euros, o que corresponde a cerca de 5,2% do PIB nacional. Entre os vários setores de atividade desta indústria destacam-se a metalurgia e metalomecânica, o setor elétrico/eletrónico e o de plásticos, borrachas e outros compósitos. Estes dados podem ser observados na Figura 6.



Figura 5 - Peso da indústria de componentes para automóveis na economia nacional (AFIA, 2021)



Figura 6 - Volume de Negócios por Atividade (AFIA, 2021)

Os valores de 2020 indicam uma diminuição de 12,8% do volume de negócios da indústria face a 2019, como se verifica na Figura 7. Esta descida deve-se, em grande parte, ao impacto negativo que a pandemia global que se atravessa de momento, está a causar em várias indústrias. Apesar da grande diminuição de exportações em 2020, a indústria de componentes automóveis continua a ser um setor altamente exportador, com as vendas ao exterior a representarem mais de 80% do volume de negócios (AFIA, 2021). Estes dados são também observáveis na Figura 7.

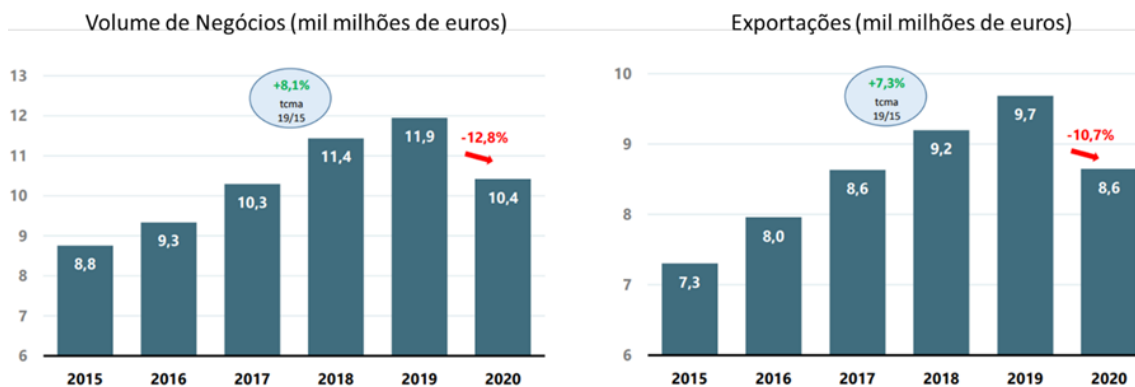


Figura 7 - Volume de negócios e Volume de exportações da indústria de componentes automóveis (AFIA, 2021)

Segundo os dados apresentados na Figura 8, 90,9% das vendas realizadas têm como destino o mercado europeu. Dentro deste mercado, a Espanha é o país que mais importa a partir de Portugal, contribuindo com 30% das exportações portuguesas. Seguidamente surgem a Alemanha com 21,1% e a França com 11,8% das exportações. Organizações como a Borgwarner, Continental, Faurecia, Renault Cacia, Tyco e TMG são os principais representantes destes valores.

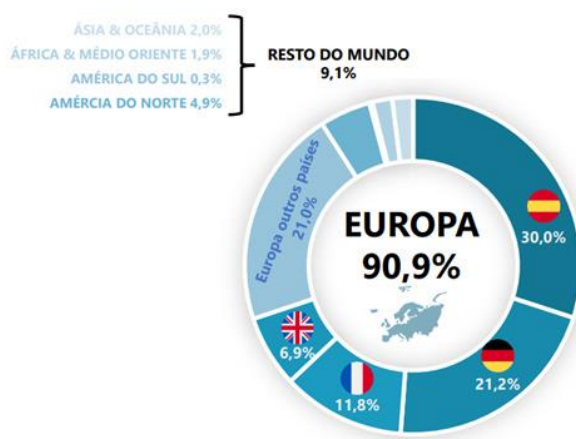


Figura 8 - Destino de Exportações a partir de Portugal (% exportações) (AFIA, 2021)

2.1.4 Requisitos principais na indústria automóvel

Normalmente a Indústria Automóvel exige uma produtividade bastante elevada, acompanhada de um grau de precisão bastante elevado, de forma a garantir altos níveis de satisfação do cliente e custos competitivos (Costa et al., 2018).

Competitividade, qualidade, prazo de entrega e flexibilidade são uns dos principais pilares da indústria automóvel. Se os primeiros dois fatores apresentam uma relevância inquestionável, tanto no passado como no presente, o último ponto torna-se um sinal da atualidade. De facto, as necessidades e requisitos dos clientes estão em constante mudança, trazendo novos paradigmas para a indústria, geralmente com foco numa produção em massa. Assim, a Indústria Automóvel alcança grandes economias de escala e a necessidade de transformação para customização em massa (onde os produtos são alterados com regularidade e as quantidades para produção são muito inferiores), aumentando assim o custo (Ribeiro & Barata, 2011).

2.1.4.1 Qualidade

Nos últimos anos, a Qualidade tornou-se um fator chave na decisão de comprar um produto em detrimento de outro. Segundo a normativa ISO (*International Organization for Standardization*), qualidade pode ser definida como “a totalidade de características de um produto que lhe conferem aptidão para satisfazer necessidades implícitas ou explícitas” (ISO 9000:2015).

A qualidade está diretamente relacionada com fatores como o custo e o prazo de entrega. O custo é o valor atribuído a um produto e que o cliente está disposto a pagar para o adquirir. Assim, um custo associado a uma elevada qualidade será refletido no valor final de um produto. O prazo de entrega é o tempo que o consumidor está disposto a aguardar pelo produto e é uma variável a ter em conta, pois terá sempre uma qualidade e um custo associados.

No que diz respeito ao enquadramento legal, a Indústria Automóvel é altamente restrita, nomeadamente a nível de segurança e ambiente. Geralmente, é desconhecido o papel desempenhado pelas normas no aumento dos níveis de qualidade, segurança, eficiência, interoperabilidade, bem como no fornecimento de todos estes benefícios, com um custo mais económico (IPQ, 2022).

O mercado exigente e competitivo em que se enquadram os fabricantes automóveis e os seus fornecedores requer a adoção de Sistemas de Gestão da Qualidade orientados para a melhoria contínua, para a redução da variação e do desperdício, bem como para a ênfase na prevenção de defeitos numa perspetiva global, e também ao longo de toda a cadeia de valor (APCER, 2022).

A indústria automóvel é uma das indústrias com maior grau de qualidade e o peso desta tende a aumentar, não só pela crescente exigência do consumidor, mas também pelos requisitos de segurança e sustentabilidade ambiental, impostos por políticas governamentais. Assim sendo, qualquer empresa ligada ao setor automóvel deve apostar em técnicas de gestão centradas na melhoria contínua, e estar preparada para receber auditorias e avaliações regularmente, na consequência do processo de certificação (Costa et al., 2018). Essas auditorias ajudam a expor disparidades e falhas nos requisitos dos produtos, e até mesmo no processo de fabrico. A aplicação deste controlo diminui, no caso de falhas, custos de reorganização, e reduz o risco de perda de características exigidas pelos consumidores.

Para garantir todas estas exigências, a nível de qualidade, produtividade, competitividade e melhoria contínua, os OEM exigem que os fornecedores adiram às restritas especificações técnicas estabelecidas pelas normas de gestão da qualidade para fornecedores do setor automóvel. Desta forma, a certificação de acordo com o referencial IATF 16949 é uma obrigatoriedade para a inclusão de uma organização nas listas de fornecedores regulares dos fabricantes de automóveis. A IATF 16949 está alinhada com a ISO 9001, respeitando a sua estrutura e requisitos. Uma organização da indústria automóvel que procure a certificação IATF 16949 também deve cumprir com a ISO 9001 (APCER, 2022). Na Tabela 3 estão apresentados os principais benefícios da certificação IATF 16949.

Tabela 3 - Principais benefícios da Certificação IATF 16949:2016 (adaptado de APCER, 2022)

Satisfação de pré-requisitos para fornecimento de produtos/serviços

Vantagens competitivas para empresas que pretendem estabelecer relações longas com compradores ou fornecedores

Implementação sistemática, integrada e coerente de ferramentas e procedimentos orientados para as especificidades do setor automóvel

A IATF 16949 uniformiza as normas de sistemas de qualidade norte americanas, alemãs, francesas e italianas existentes no setor automóvel, onde se incluem as normas QS-9000, VDA6.1, EAQF e ASQ. Este referencial identifica os requisitos que têm de ser satisfeitos pelos sistemas de qualidade para o design/desenvolvimento, fabrico, instalação e serviço de qualquer produto do setor automóvel, permitindo que as empresas ganhem credibilidade e transmitam a confiança necessária para os consumidores, no que toca à qualidade (Pop & Elod, 2015). Além das certificações, observa-se ainda um esforço e investimento na melhoria de produtos e processos, recorrendo a atividades internas de engenharia. Surge novamente a competitividade no mercado automóvel num lugar de destaque, pois levou a que a certificação dos fornecedores passasse a ser uma exigência dos clientes, deixando de ser opcional (Soares, 2016).

2.1.4.2 Flexibilidade

Atualmente, pede-se aos fabricantes automóveis uma variedade altíssima de produtos, de forma a continuarem competitivos e irem ao encontro dos desejos dos clientes, permanecendo focados em todas as inovações tecnológicas (Chakravarty & Balakrishnan, 2001). Com esta tendência atual é gerada uma transformação no que à produção diz respeito, a qual evoluiu em poucos anos, desde uma produção em massa, até uma personalização elevada ou extrema (Michalos et al., 2010; Nagorny et al., 2012).

Geralmente, uma empresa é considerada flexível, quando tem a capacidade de fabricar uma gama de produtos (a maioria pré-programados) com equipamentos versáteis (Ribeiro & Barata, 2011). O objetivo das organizações é satisfazer os diferentes requisitos, combinando a sua oferta com as diferentes exigências dos clientes. No entanto, esta estratégia traz novos desafios para as empresas, devido ao aumento da complexidade de fabrico. Os OEM podem sofrer uma redução de desempenho em muitas das suas atividades na cadeia de fornecedores, devido às reduzidas economias de quantidade, com potencial impacto negativo nos custos dos componentes, *lead time* e *stock*. Além disso, o número de componentes em *stock* aumenta, implicando maiores custos de armazenamento (Fisher & Ittner, 1999; Thonemann & Bradley, 2002).

A principal questão estratégica em relação à diversidade de produtos é selecionar o nível de variedade ideal ou adequado: oferecer diversidade faz com que o custo aumente, mas leva à diferenciação do produto no mercado e desta forma os fabricantes podem expandir a sua participação no mesmo e aumentar o volume de vendas (Lancaster, 1990). Assim, o sucesso de uma empresa automóvel depende da capacidade de o seu sistema de produção ser flexível e da possibilidade reconfiguração de acordo com os requisitos do mercado (Costa et al., 2017). A existência de uma produção flexível implica um elevado número de componentes do sistema de produção e relação entre os mesmos. O conceito de gestão de flexibilidade pode ser

definido como a maximização dos benefícios e redução da complexidade (Javid et al., 2020).

2.1.4.3 Prazo de entrega

Lado a lado com a qualidade do produto ou do serviço, existem exigências, por parte do cliente final, relativamente ao prazo de entrega, fazendo deste parâmetro um pilar importante na indústria automóvel.

Com a necessidade de reduzir o tempo de espera por parte do consumidor, as empresas criaram técnicas e princípios de produção, como a filosofia *Just-In-Time* (JIT), que assim garantem que os produtos chegam ao consumidor no menor tempo possível, sem comprometer a qualidade dos mesmos. O princípio JIT passa pela produção apenas do necessário, de modo que, a indústria orienta-se pelos pedidos dos consumidores, tentando corrigir os pontos de estrangulamento (*bottleneck*). Por outro lado, é feito também o controlo dos fornecedores, de forma a garantir que estes fornecem apenas as matérias-primas necessárias, levando assim a uma redução de tempos de entrega e custos (Andjelkovic, 2017).

Apesar dos esforços singulares por parte das empresas, o prazo de entrega é um parâmetro que não depende apenas da própria empresa. Para garantir a coordenação correta entre consumidores e fornecedores, foi implementado no setor automóvel o Processo de Aprovação de Peças de Produção (PAPP), sendo este um documento padrão que estabelece uma série de acordos entre fornecedores e clientes, representando uma prova de que o fornecedor apresenta capacidade de abastecer o cliente com o que este solicita dentro dos prazos estipulados (Corporation, 2012). O PPAP é um conceito com cinco níveis diferentes, começando num nível de rigor mais baixo (nível 1), até atingir o nível de rigor mais elevado (nível 5). Os parâmetros que constituem este conceito estão apresentados na Figura 9.

Compete à gestão de topo de cada empresa escolher entre produzir produtos normalizados ou personalizados. Se a empresa pretender prazos de entrega mais curtos, deve optar pela produção dos primeiros; caso pretenda prazos de entrega mais dilatados, deve optar pelos segundos. Neste caso, é fundamental que as empresas possuam sistemas de produção flexíveis o suficiente para a realização de operações dedicadas, capazes de garantir produtos personalizados nos prazos requisitados (de Treville et al., 2004).

		Nível de PPAP				
		1	2	3	4	5
1	Registos da conceção	R	S	S	*	R
	- para componentes/detalhes proprietários	R	R	R	*	R
	- para os restantes componentes/detalhes	R	S	S	*	R
2	Documentos relativos a alterações de engenharia, ser for o caso	R	S	S	*	R
3	Customer Engineering approval, if required	R	R	S	*	R
4	Aprovação da Engenharia do cliente, se necessário	R	R	S	*	R
5	Fluxogramas do processo	R	R	S	*	R
6	FMEA de Processo	R	R	S	*	R
7	Plano de Controlo	R	R	S	*	R
8	Estudos de análise ao Sistema de Medição	R	R	S	*	R
9	Resultados dimensionais	R	S	S	*	R
10	Resultados dos testes de performance dos materiais	R	S	S	*	R
11	Estudos de processo iniciais	R	R	S	*	R
12	Documentação de Laboratórios qualificados	R	S	S	*	R
13	Relatório de Aprovação de Aparência (AAR), se aplicável	S	S	S	*	R
14	Amostras do produto	R	S	S	*	R
15	Amostras padrão	R	R	R	*	R
16	Ajudas ao controlo	R	R	R	*	R
17	Registos de cumprimento dos requisitos específicos do cliente	R	R	S	*	R
18	Part Submission Warrant (PSW)	S	S	S	S	R
	Checklist do material a granel	S	S	S	S	R

S = A organização deve enviar ao cliente e manter uma cópia dos registos e itens de documentação em locais apropriados.

R = A organização deve manter em locais apropriados e pôr à disposição do cliente, mediante solicitação.

* = A organização deve manter em locais apropriados e apresentar ao cliente mediante solicitação.

Figura 9 - Parâmetros que fazem parte do PPAP (adaptado de AIAG, 2006)

2.2 Cablagem automóvel

2.2.1 Enquadramento e características

A evolução da indústria automóvel e as exigências do mercado fizeram com que os fabricantes tivessem a necessidade de adotar novos métodos na conceção e construção do automóvel. O automóvel começou a incorporar novos sistemas que até então eram pouco utilizados. Estes sistemas foram implementados para melhorar o desempenho, o conforto e a segurança, sendo que, de cada vez que se acrescentava um novo sistema, havia mais cablagem (Figura 10) associada a instalar (A. Silva, 2009).



Figura 10 - Exemplos de cablagem utilizada no automóvel (Yazaki, 2019)

A cablagem automóvel é um conjunto de fios elétricos, normalmente de cobre, que é usado nos automóveis para conectar componentes eletrônicos, unidades de controle, sensores e atuadores. As extremidades dos cabos são equipadas com terminais elétricos, opcionalmente equipados com isolantes de fios e inseridos em conectores (Figura 11), denominados de *plugs* (extremidade macho) e *jacks* (extremidade fêmea). Conectores com mecanismos de bloqueio e isolantes são usados para proteger a integridade das conexões elétricas de fatores ambientais, como o choque e vibração, abrasão, humidade ou poeiras (Trommnau et al., 2019). A função dos terminais elétricos (Figura 11) é realizar uma ligação separável sem desperdício elétrico de dois elementos de um sistema eletrônico, apresentando funções mecânicas e elétricas. Mecanicamente, o material do terminal deverá ser resistente à corrosão, ser fácil de soldar, ser capaz de sofrer conformação, ser elástico e ser resistente à temperatura. Do ponto de vista elétrico, o terminal deverá apresentar boa condutividade elétrica. Os fios de cobre são fabricados de três formas diferentes, para cobrir aplicações distintas. Os exemplos na Figura 12 mostram os condutores trançados, flexíveis e sólidos.



Figura 11 - Conectores e terminais elétricos (TE, 2022)

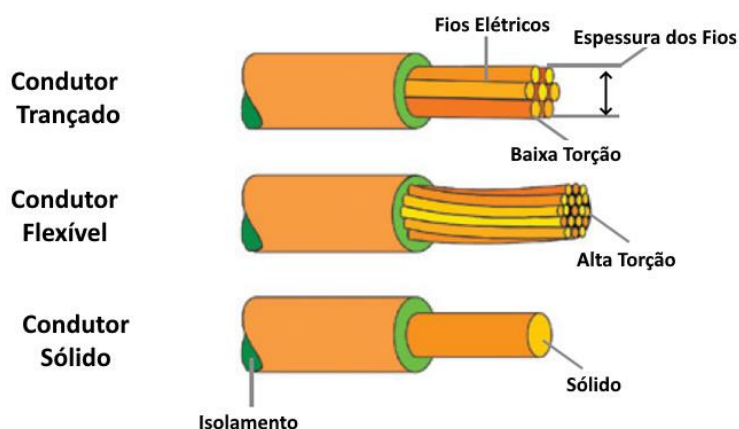


Figura 12 - Diferentes tipos de condutores elétricos (CableCraft, 2019)

Com a utilização cada vez mais diversa de sistemas eletrônicos de segurança como o ABS, o ESP e o TCS, juntamente com o crescimento do mercado de veículos híbridos e elétricos, a necessidade de utilização de cablagens tem vindo a aumentar. No geral, os veículos atuais apresentam vários milhares de fios condutores únicos, com um comprimento de vários quilómetros no total (Trommnau et al., 2019).

2.2.2 Mercado de cablagens

Em 1929, Sadami Yazaki, pioneiro na indústria de cablagens, fundou a Mitsuya Electric Wire e começou a vender fios elétricos para automóveis. Mais tarde, em 1939, Yazaki inaugurou a Ogu Factory (Figura 13), a sua primeira fábrica, em Tóquio, e só aí começou a produzir a sua própria cablagem automóvel. É apenas em 1941 que a Yazaki Corporation, a atual líder do mercado, é estabelecida. O grande crescimento que a Yazaki viveu nas décadas de 30 e 40 deveu-se, principalmente, à enorme evolução da indústria automóvel. Na Figura 14 é possível observar o valor de vendas líquidas da Yazaki e a sua distribuição a nível geográfico no ano fiscal de 2020 (Yazaki, 2021).



Figura 13 - - Yazaki e os seus colaboradores na Ogu Factory (Yazaki, 2021)

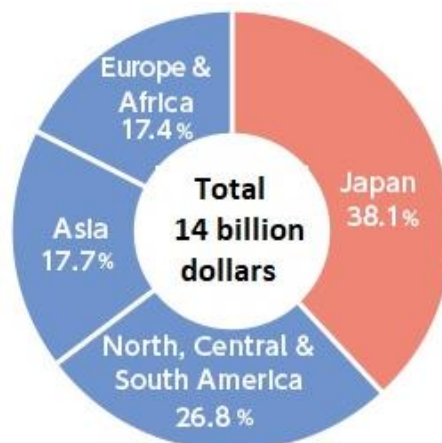


Figura 14 - Distribuição de vendas líquidas no ano fiscal de 2021 por região (Yazaki, 2021)

Além da Yazaki Corporation, outra grande referência a ter em conta é a Sumitomo, que surge em 1931, também no Japão. Em 1959, a Sumitomo iniciou a produção de cablagens para veículos de duas rodas e, dois anos mais tarde, para automóveis. No ano de 2010, a Sumitomo explorou uma alternativa aos fios elétricos normalmente utilizados na indústria automóvel, desenvolvendo fios elétricos de baixa tensão em alumínio (Sumitomo, 2018). Para além das duas grandes empresas deste setor já mencionadas, merecem a distinção também a Aptiv PLC (anteriormente Delphi Automotive PLC), a Leoni e a Lear (PW, 2021). Na Figura 15 é possível constatar como estava dividido o domínio do mercado das cablagens para automóveis em 2010.

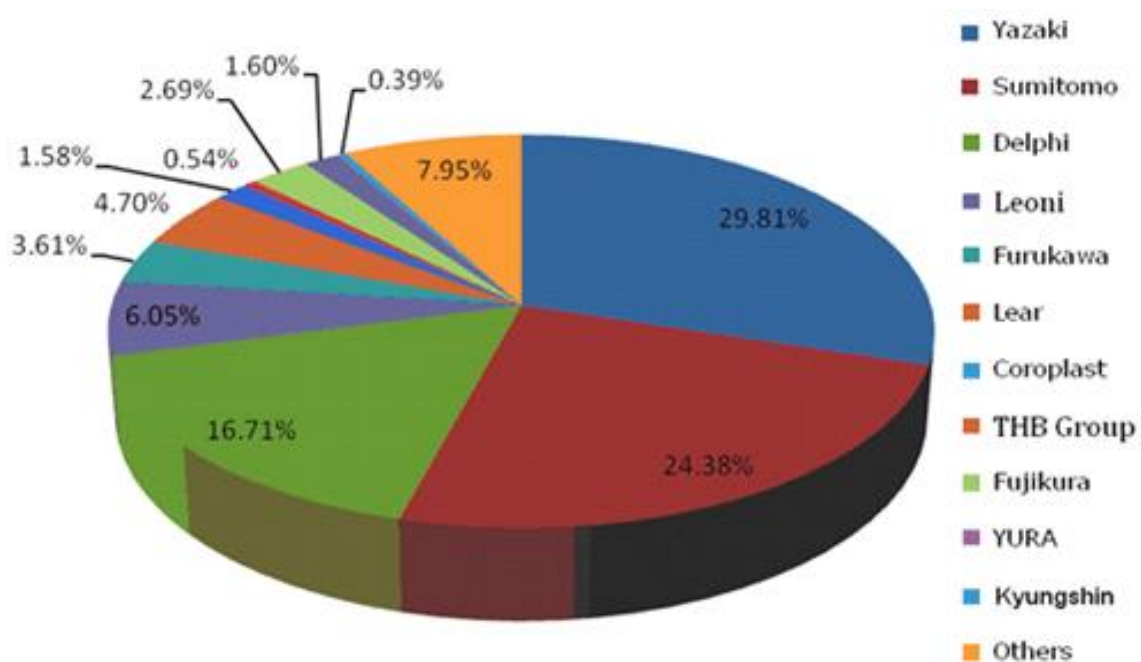


Figura 15 - Distribuição do mercado de cablagens entre os maiores fabricantes no ano de 2010 (RIC, 2010)

2.2.3 Ferramentas de cravação existentes

O tipo de ferramenta de cravação a utilizar depende, principalmente, do volume de terminais a cravar. Para produções de quantidades muito baixas, protótipos e reparações, são normalmente utilizadas ferramentas manuais (Figura 16), enquanto para produções de maior volume são utilizados aplicadores semiautomáticos (TE, 2019). Dependendo do tipo de cravação a realizar, os aplicadores podem ter diferentes configurações. Estas diferenças existem, essencialmente, no tipo de alimentação das ferramentas.



Figura 16 - Ferramentas de cravação manual (TE, 2019)



Figura 17- Representação dos diferentes tipos de alimentação dos aplicadores (Castro et al., 2017)

A atuação dos aplicadores semiautomáticos de cablagem pode ser mecânica ou pneumática. Nos aplicadores mecânicos, o movimento do porta-punções do aplicador é o que faz provocar o movimento do sistema de alimentação. Nas ferramentas de cravação pneumáticas, é um cilindro de ar comprimido o responsável pela movimentação do sistema de alimentação. Para além da forma de atuação dos aplicadores, a direção da alimentação dos terminais relativamente à alimentação do fio elétrico (realizada por um sistema independente) é também um ponto de distinção. Como apresentado na Figura 17, esta alimentação pode ser feita lateralmente (*side feed*), ou seja, perpendicularmente à alimentação do fio elétrico; ou frontal (*end feed*), na mesma direção do fio elétrico, mas em sentido contrário. A direção de alimentação é definida pelo terminal a cravar, que pode ser próprio para alimentação lateral ou frontal, conforme é observável na Figura 18. Por outro lado, a forma de atuação (mecânica ou pneumática) depende apenas da preferência de quem irá realizar as cravações.



Figura 18 - Terminal de cravação frontal e terminal de cravação lateral (adaptado de CasaDoAutoElétrico, 2022)

Associados aos aplicadores de cablagens estão também um conjunto de peças (Figura 19). Dentro deste conjunto de peças, é de destacar os punções de cravação (posições 6 e 7 da Figura 19) e os anvis (posição 9 da Figura 19). São estes componentes que conferem a geometria desejada nos terminais elétricos no momento da cravação e, por isso, também são estes os constituintes dos aplicadores de cablagem sujeitos a maior desgaste. Por este motivo, tanto os punções como os anvis são produzidos em materiais com elevada resistência mecânica, e são normalmente sujeitos a tratamentos térmicos e superficiais para terem o melhor desempenho possível, conseguindo atingir elevados números de ciclos de cravação.

End Feed Applicator

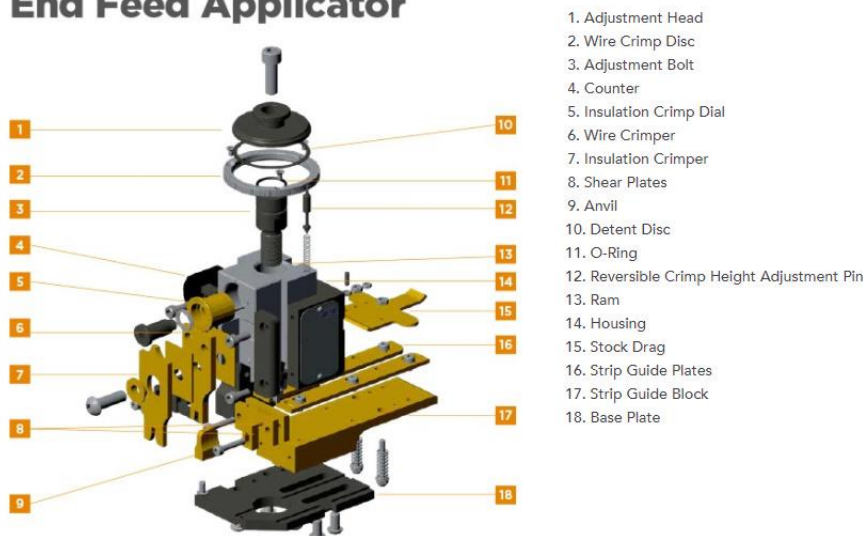


Figura 19- Componentes de um aplicador de alimentação frontal (TE, 2022)

2.2.4 Descrição do processo de cravação de terminais elétricos

Os terminais são um componente essencial das cablagens, terminando um condutor de uma maneira específica, de modo a assegurar e proteger a conexão eletromagnética. Os terminais possuem uma grande variedade de designs, sendo que cada cablagem é única e projetada para uma aplicação específica, cada uma com o seu

próprio conjunto de restrições (Jongwuttanaruk & Thavornwat, 2022). Escolher os conectores e os terminais corretos para uma operação é crucial para o desempenho geral da cablagem (Rajak & Kore, 2018).

Os terminais estão divididos em quatro setores diferentes (Figura 20): (a) a zona de ligação entre os diversos terminais, removido na operação de cravação; (b) a zona de cravação do isolamento, composta por duas abas que serão pressionadas contra o fio condutor; (c) a zona de cravação do fio, idêntica à zona de cravação do isolamento, mas geralmente mais longa; (d) a zona de conexão, responsável pela conexão ao outro terminal do par macho/fêmea (Castro et al., 2017).

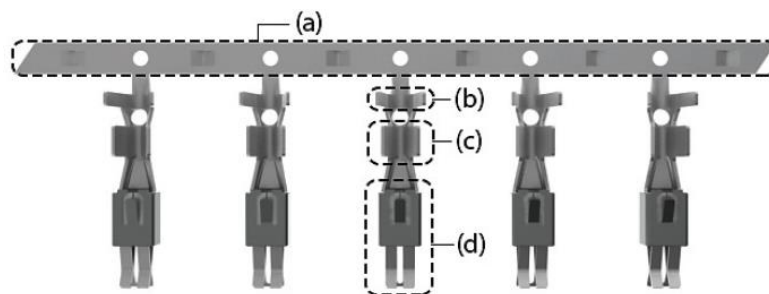


Figura 20 - Diferentes setores de um terminal elétrico (Castro et al., 2017)

A cravação é um processo que cria a conexão mecânica entre um terminal elétrico e um ou mais filamentos de fios condutores elétricos. Para elevados números de cravação, uma ferramenta muito específica – o aplicador – está envolvida no processo (Silva et al., 2020). Na Figura 21 são apresentadas as principais fases do processo.

Fase 1 - Posicionamento

1. Todos os componentes estão na posição correta
2. Punção em contato com as extremidades do terminal
3. Terminal começa a dobrar

Fase 2 - Enrolamento

Garras do terminal atingem o ponto mais alto e começam a enrolar



Fase 3 - Compactação

1. A prensa atinge o seu ponto mais baixo
2. O terminal assume a forma do punção e do anvil
3. A prensa começa a subir



Figura 21 - Descrição gráfica do processo de cravação (adaptado de Silva et al., 2020)

2.2.5 Principais problemas na cravação de cablagens

A cravação é um processo de deformação controlada de conformação plástica a frio, que permite conseguir uma ligação rígida entre o terminal e o fio condutor. O mais habitual é os problemas da cravação surgirem nas zonas do isolamento e do condutor, sendo que a zona de conexão normalmente não interfere no processo de uma forma

ativa e a zona de ligação apenas sofre um corte simples (Castro et al., 2017). Os problemas mais comuns na cravação dos terminais podem ter as seguintes causas:

- ❖ Propriedades incorretas do material, que poderão levar a defeitos no terminal:
 - **Deformação descontrolada dos terminais** (Figura 22)

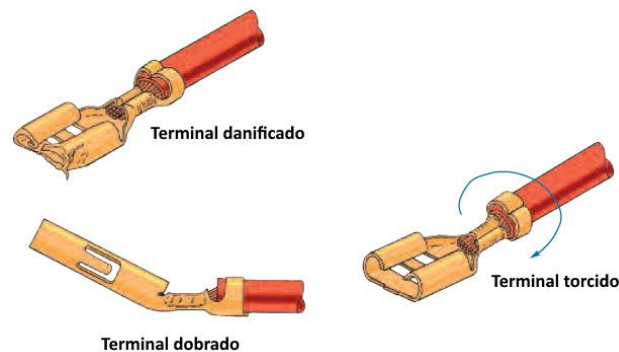
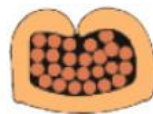


Figura 22 - Exemplos de deformações dos terminais (adaptado de TE, 2019)

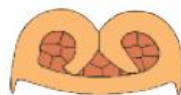
- ❖ Força de cravação incorreta, que poderá provocar os seguintes problemas:
 - **Fios de cobre soltos** – Força de cravação reduzida (Figura 23)



**Deformação insuficiente,
mostrando vazios**

Figura 23- *Micro-cut* de uma cravação com força reduzida (adaptado de TE, 2019)

- **Esmagamento do terminal** – Força de cravação excessiva (Figura 24)



**Rebarba na parte inferior
do terminal, devido a força
excessiva de cravação**

Figura 24- *Micro-cut* de uma cravação com força excessiva (adaptado de TE, 2019)

- ❖ Escolha incorreta dos terminais ou dos fios elétricos que poderá causar:
 - **Terminal de cravação não fecha** – Fios elétricos demasiado largos ou quantidade excessiva de fios (Figura 25)



Terminal não fecha

Figura 25- *Micro-cut* de uma cravação com fios demasiado largos para o terminal escolhido (adaptado de TE, 2019)

- **Pernas do terminal muito próximas da zona inferior – Fios elétricos demasiado finos (Figura 26)**



**Pernas demasiado próximas da zona inferior do terminal
Deformação insuficiente dos fios elétricos, mostrando vazios**

Figura 26 - *Micro-cut* de uma cravação com fios demasiado finos (adaptado de TE, 2019)

- ❖ Ajustes incorretos no mecanismo de alimentação do aplicador ou na geometria dos punções e anvis de cravação utilizados, de onde podem surgir os seguintes defeitos:

- **Cravação assimétrica – Alimentação do terminal ajustada incorretamente (Figura 27)**



Alimentação do terminal ajustada incorretamente

Figura 27- *Micro-cut* de uma cravação com alimentação do terminal desajustada (adaptado de TE, 2019)

- **Formação excessiva de rebarbas e/ou fissuras – Punção e anvil desalinhados ou com demasiado desgaste (Figura 28)**



Punção e anvil desalinhados ou com elevado desgaste

Figura 28 - *Micro-cut* de uma cravação feita com os *crimpers* desalinhados (adaptado de TE, 2019)

Todos estes problemas na cravação têm consequências e custos associados. As consequências podem ir desde um pior desempenho dos terminais elétricos até possíveis falhas catastróficas, originadas pela separação do terminal e dos fios

elétricos. Na Figura 29 é possível observar um gráfico que relaciona as cravações não conformes com a sua severidade e custo associado.

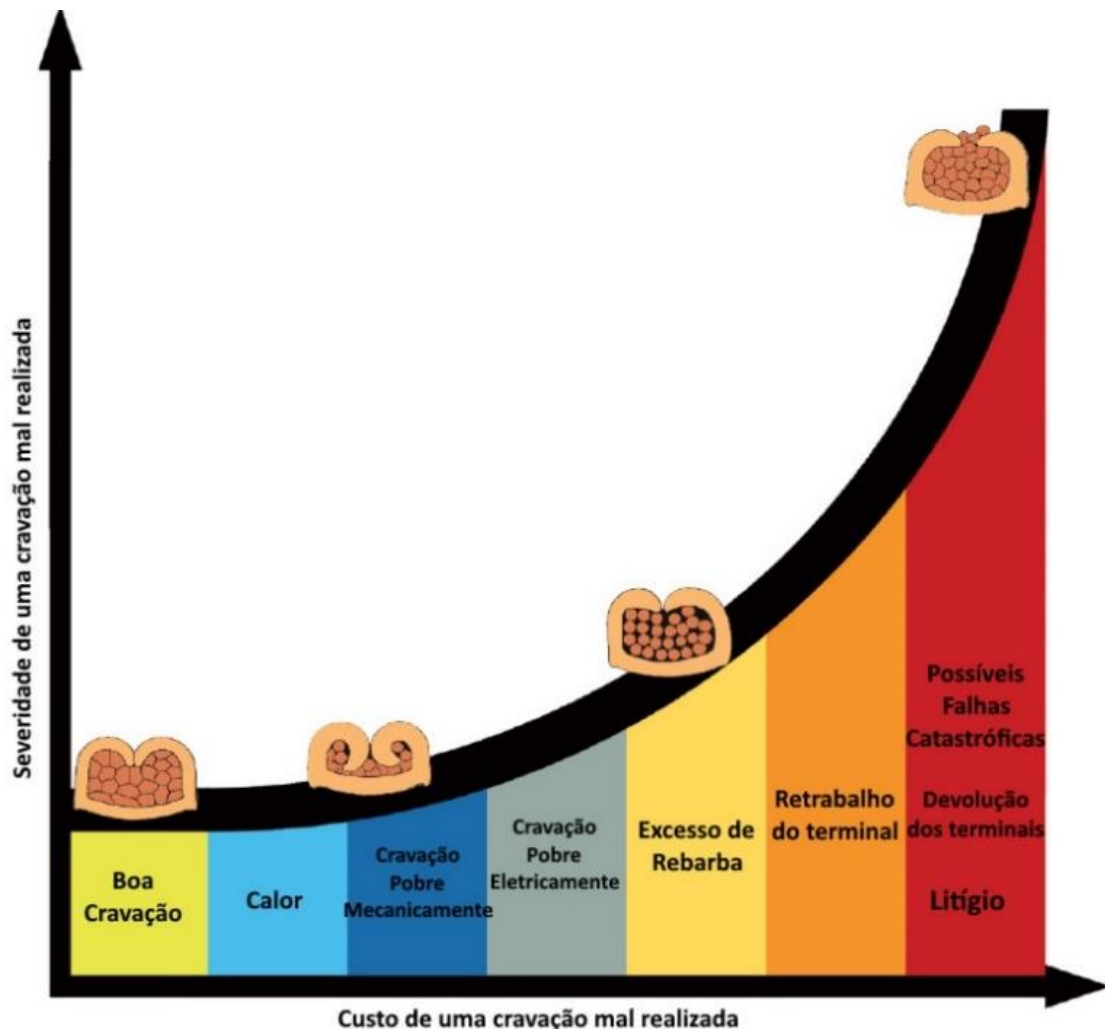


Figura 29- Custo e severidade de cravações mal efetuadas (adaptado de TE, 2019)

Para além de análises visuais realizadas pelos operadores que efetuam as cravações, são também realizados outros testes como corte de secção (*micro-cut*) e teste de tração do cabo condutor (*pull force*). Estes testes permitem fazer uma análise mais crítica e com maior precisão do que a análise visual. No teste de *micro-cut* é feito um corte transversal na zona de cravação para esta ser analisada microscopicamente. Numa cravação bem efetuada, o *micro-cut* deverá mostrar que não existem fios soltos, que não ocorreu fissuração das paredes do terminal e que este tem os dois lados em contato e simetricamente comprimidos com a forma do punção. O *micro-cut* de uma cravação bem realizada pode ser observado na Figura 30. No teste de tração do cabo, é verificada a força de tração que é necessária aplicar para provocar a separação do fio condutor do terminal. Cada fabricante automóvel estabelece um valor mínimo de *pull force* e, caso a força que causou a separação seja inferior ao valor estabelecido,

considera-se que a cravação não foi bem executada. Estes testes permitem avaliar quais são os ajustes necessários efetuar para que existe uma boa cravação dos terminais.



Cravação bem efectuada

Figura 30 - *Micro-cut* de uma cravação bem efectuada (adaptado de TE, 2019)

2.3 Materiais, tratamentos e revestimentos superficiais utilizados nas ferramentas de cravação

2.3.1 Visão geral dos materiais

Em todos os órgãos mecânicos, a seleção de materiais deve ser feita tendo em conta os requisitos finais e o seu propósito. Não obstante a intensa competição que se tem vindo a observar ao longo das últimas décadas, o aço continua a ser um dos materiais mais importantes em construção mecânica e tem conseguido manter-se como o material com maior número de aplicações na atualidade, em virtude da sua grande versatilidade. O extraordinário leque de propriedades exibidas pelos diversos tipos de aço é conseguido através de simples variações de composição ou por intermédio de processamentos térmicos ou mecânicos. Além dos seus principais elementos de liga, (ferro e carbono), os aços contêm sempre outros elementos secundários presentes devido aos processos de fabrico (Pannoni, 2010).

Os aços podem ser classificados de diversas formas, sendo uma delas pela sua composição química. Por este processo de classificação, os aços podem ser divididos em duas classes (Chiaverini, 2002):

- Aços não ligados: São aqueles que apenas contêm carbono como elemento de liga do ferro. Podem ainda aparecer outros elementos como o Si, Mn, Al, Ti e Cu, porém a sua percentagem é apenas residual e devido a contaminações provenientes do processo de fabrico.
- Aços ligados:
 - Fortemente ligados: São aqueles cujo teor total dos elementos de liga é superior a 5%.
 - Fracamente ligados: São aqueles cujo teor total dos elementos de liga é inferior a 5%.

Cada um dos elementos de liga tem uma determinada influência no aço e por isso, nos aços de liga, os elementos de liga são especialmente adicionados para dar aos aços as propriedades pretendidas. Na Tabela 4 apresenta-se com que finalidade são adicionados aos aços os diversos elementos de liga.

Tabela 4- Efeito dos elementos de liga nos aços (Soares, 2005)

Aumentar a resistência à tração	Carbono (C), Crómio (Cr), Manganês (Mn), Níquel (Ni)
Melhorar a maquinabilidade	Chumbo (Pb), Enxofre (S), Selénio (Se)
Aumentar a resistência ao desgaste	Crómio (Cr), Manganês (Mn), Molibdénio (Mo), Tungsténio (W)
Aumentar a penetração de têmpera	Carbono (C), Crómio (Cr), Manganês (Mn), Molibdénio (Mo), Níquel (Ni)
Tornar os aços aptos para a têmpera no óleo ou no ar	Crómio (Cr), Manganês (Mn), Molibdénio (Mo), Níquel (Ni)
Diminuir a fragilidade no revenido	Molibdénio (Mo), Vanádio (V)
Aumentar a resistência ao revenido	Cobalto (Co), Molibdénio (Mo), Tungsténio (W), Vanádio (V)
Aumentar a resistência a temperaturas elevadas	Cobalto (Co), Crómio (Cr), Molibdénio (Mo), Tungsténio (W), Vanádio (V)
Aumentar a resistência ao desgaste a quente	Crómio (Cr), Molibdénio (Mo), Tungsténio (W), Vanádio (V)
Aumentar a dureza a temperaturas elevadas e a duração de corte	Crómio (Cr), Molibdénio (Mo), Tungsténio (W), Vanádio (V)
Aumentar a resistência à corrosão	Cobre (Cu), Crómio (Cr), Molibdénio (Mo), Níquel (Ni), Silício (Si)
Obter e manter estruturas específicas tais como austenite ou ferrite	Alumínio (Al), Azoto (N), Crómio (Cr), Níquel (Ni)
Obter propriedades físicas particulares como as requeridas pelos ímanes, aços amagnéticos, aços para aplicações nucleares	Alumínio (Al), Azoto (N), Boro (B), Cobalto (Co), Crómio (Cr), Manganês (Mn), Níquel (Ni)

Outro método de classificação dos aços é a sua aplicação. Este critério é utilizado quando se pretende definir um aço para cumprir uma determinada função. Através deste critério é possível dividir os aços em três grandes grupos (Soares, 2005):

1. Os **aços de construção**, ligados ou não ligados, são utilizados na construção de peças que irão ser utilizadas individualmente ou fazendo parte de máquinas. Geralmente, estes são trabalhados ou utilizados no estado de fornecimento (normalmente no estado recozido).
2. Os **aços para ferramentas**, fortemente ou fracamente ligados, destinam-se ao fabrico de ferramentas de qualquer tipo. Estes aços são tipicamente fornecidos no estado recozido, e de seguida sofrem operações de maquinagem e retificação, seguidas de tratamento térmico de modo a melhorar as suas propriedades mecânicas para os níveis pretendidos.
3. Os **aços especiais** possuem um teor elevado em elementos de liga. Neste grupo estão incluídos os aços refratários, inoxidáveis, resistentes aos ácidos, entre outros.

O tipo de aço globalmente mais utilizado para o tipo de ferramentas em estudo é o aço para ferramentas, que pode ser dividido nas seguintes categorias (Soares, 2005):

- **Aços rápidos:** atribui-se esta designação aos aços temperáveis, cuja composição química permite apresentar uma elevada resistência ao revenido até cerca de 600°C. Estes aços são utilizados no fabrico de ferramentas para maquinagem com elevado rendimento, mesmo a grandes velocidades de corte. Este tipo de aço caracteriza-se pela sua dureza elevada e uma máxima resistência ao desgaste. Os elementos de liga que estão presentes neste tipo de aço normalmente são: C, W, Mo, Co, V e Cr.
- **Aços para trabalho a frio:** estes aços caracterizam-se por uma elevada temperabilidade e tenacidade, o que permite sujeitar as ferramentas a esforços elevados de choque e compressão a frio. A temperabilidade deve-se ao elevado teor em Ni e Cr.
- **Aços para trabalho a quente:** estes aços devem apresentar propriedades que permitam suportar as exigências de um trabalho a temperaturas elevadas. As características principais que estes aços devem possuir são: reduzida sensibilidade aos choques térmicos (resistência a variações bruscas de temperatura); boa condutividade térmica (pois facilita o escoamento de calor e evita o aquecimento exagerado da ferramenta); boa resistência a quente (capacidade de operar a velocidades e avanços mais elevados do que os restantes aços) e grande resistência ao desgaste a quente. Os elementos de liga que fornecem estas características aos aços são o Cr, Mo, W e V.
- **Aços resistentes ao choque:** estes aços são utilizados quando se pretende uma grande resistência à fadiga. Como esta característica depende da tenacidade, o teor de carbono é inferior ao de outros aços, uma vez que esta diminuição provoca uma redução da dureza e um aumento da tenacidade. Os elementos mais influentes que fazem parte da sua constituição são o Si, W, Cr e V.

2.3.2 Aços utilizados nas ferramentas de cravação

Na produção específica de cada componente, a escolha do aço representa um fator essencial, uma vez que cada tipologia de aço apresenta propriedades próprias. No caso das ferramentas de cravação, os materiais devem apresentar propriedades como alta dureza à temperatura ambiente, associada a uma boa temperabilidade; alta resistência ao desgaste, que permita que a ferramenta seja durável; resiliência, para que as ferramentas suportem o choque das cravações; tenacidade, para evitar a progressão de possíveis fendas; alta resistência mecânica, essencialmente tensão limite elástico e de rotura; e ainda uma elevada resistência à fadiga, uma vez que estes componentes devem atingir um número elevado de ciclos de cravação. Nos equipamentos de cravação, nos quais a velocidade de trabalho é elevada, é gerada uma grande quantidade de calor, o que provoca um grande aquecimento dos componentes mais solicitados, os punções e os anvis. Com o aumento da temperatura existe a tendência de o material perder alguma da sua dureza, e conseqüentemente a sua resistência ao desgaste. Como tal, estes componentes devem apresentar excelentes propriedades em relação à resistência ao desgaste e dureza a quente (Castro et al., 2017).

Um dos aços mundialmente mais utilizado para este tipo de ferramentas é o AISI S7. Este é um aço para ferramentas, sendo um dos importantes materiais de resistência ao choque de acordo com as indústrias de fabricação de ferramentas. Este aço ligado apresenta elevado teor em crómio e molibdénio, e é amplamente utilizado em ferramentas de corte e estampagem porque possui excelentes propriedades termomecânicas, como elevada resistência ao choque, alta temperabilidade e elevada tenacidade em temperaturas elevadas (Pfefferkorn et al., 2014). A maioria dos componentes maquinados requerem tratamento térmico para aumentar a resistência ao desgaste e lidar com a alta temperatura durante o seu funcionamento. Assim, o aço AISI S7 temperado (48–60 HRC) torna-se parte dos materiais difíceis de maquinar (Awale & Inamdar, 2020). Posto isto, o AISI S7 temperado apresenta uma maior dificuldade em ser maquinado por processos mais convencionais, como a fresagem e o torneamento. A sua maquinagem convencional torna-se ainda bastante mais dispendiosa, devido ao maior desgaste das ferramentas. Estas dificuldades levam à necessidade da utilização de processos como a erosão de fio e a retificação. Na Tabela 5 pode-se observar a composição química típica do aço AISI S7.

Tabela 5 - Composição química típica do aço AISI S7 (Bohler, 2013)

Composição	C	Si	Mn	Cr	Mo	S
Química Típica (%)	0,53	0,3	0,7	3,2	1,5	0,005 max.

2.3.3 *Tratamentos e revestimentos superficiais*

De forma a melhorar o funcionamento e a aumentar a vida útil das ferramentas de cravação, para além da utilização dos materiais e tratamentos térmicos a que os componentes são normalmente sujeitos, como a têmpera e o revenido, geralmente também são realizados tratamentos superficiais (Castro et al., 2017). Estes tratamentos previnem a oxidação do material e diminuem drasticamente o desgaste das ferramentas. Os tratamentos superficiais podem ser termoquímicos, como a cementação e a nitruração, que permitem o aumento da dureza da superfície da peça, o que melhora a sua resistência ao desgaste, através da deposição de uma camada de dureza superior à do material revestido, mantendo as propriedades no seu interior (Soares, 2005). Outro tipo de tratamentos superficiais são os revestimentos, que podem representar uma proteção contra a abrasão, corrosão ou oxidação, por exemplo, devido à criação de uma barreira entre a peça e o meio, através de uma camada com propriedades diferentes das do material (Suchy, 2006).

2.3.3.1 *Cromagem*

A cromagem é um processo de aplicação de crómio sobre um metal, através de um processo eletrolítico, a fim de torná-lo mais resistente à corrosão, para alterar suas propriedades elétricas ou térmicas, aumentar a resistência ao desgaste (cromagem a duro) ou apenas por motivos estéticos (cromagem decorativa). O processo dá-se a partir de banhos de ácido crómico com pequena percentagem de ácido sulfúrico. Os elementos mais utilizados na cromagem são o crómio trivalente e o crómio hexavalente, também chamado de crómio duro, que são os elementos mais estáveis (Antonetti et al., 2021).

A cromagem a duro apresenta um baixo coeficiente de atrito, não sendo necessário o uso de lubrificantes, pois este revestimento não gera a adesão de partículas e consegue elevar a dureza superficial das ferramentas. Este revestimento é o mais utilizado a nível mundial nos punções de cravação, devido à sua elevada dureza, e resistência ao desgaste e abrasão, com baixo coeficiente de atrito, conseguindo-se superfícies espelhadas após polimento, com espessuras da camada depositada entre 1 µm até 350 µm. Contudo, a cromagem a duro está a ser cada vez mais evitada devido a pressões reguladoras, que se devem à natureza tóxica do crómio duro hexavalente. Este é mutagénico, cancerígeno, suspeito de afetar a fertilidade, tóxico para os organismos aquáticos, entre outras características indesejáveis. Assim, é fundamental arranjar encontrar outras alternativas de revestimentos com propriedades mecânicas semelhantes, mas sem características nocivas para o ambiente (van Doan et al., 2017).

2.3.3.2 Revestimentos PVD

O PVD – *Physical Vapor Deposition*, ou Deposição Física de Vapor, é uma tecnologia bem conhecida, amplamente utilizada para a deposição de filmes finos atendendo a diversas necessidades, nomeadamente a melhoria do comportamento tribológico, o aprimoramento ótico, a melhoria visual/estética e muitos outros campos, tendo assim uma ampla gama de aplicações já perfeitamente estabelecidas (Baptista et al., 2018).

A técnica PVD é um processo de deposição de um filme fino no qual o revestimento cresce no substrato, átomo a átomo (Decher & Schlenoff, 2012). O PVD envolve a atomização ou vaporização de material de uma fonte sólida, normalmente chamado de alvo. Os filmes depositados geralmente possuem desde camadas com espessuras tão finas quanto algumas camadas atômicas, até filmes com espessuras de vários micrómetros. Este processo provoca uma mudança nas propriedades da superfície e da zona de transição entre o substrato e o material depositado. Por outro lado, as propriedades dos filmes podem também ser afetadas pelas propriedades do substrato (Baptista et al., 2018). O processo de deposição atômica pode ser feito num ambiente de vácuo, gasoso, plasma ou eletrolítico. Um ambiente de vácuo na câmara de deposição irá reduzir a contaminação gasosa no processo de deposição para um nível muito baixo (Mattox, 1998).

O PVD é um excelente processo de revestimento para melhorar a resistência ao desgaste e à corrosão (Hoche et al., 2014). Este processo é também bastante requisitado para aplicações funcionais, como ferramentas, peças decorativas, aprimoramento ótico, moldes, matrizes, punções e lâminas. Estes são apenas alguns exemplos da ampla gama de aplicações já bem estabelecidas (Fox-Rabinovich et al., 2016; Korhonen et al., 2018). O equipamento utilizado nesta técnica requer baixa manutenção e o processo é “amigo do ambiente”. Os benefícios dos revestimentos PVD são muitos, uma vez que estes podem fornecer vantagens que agregam durabilidade e valor aos produtos, pelo que têm um papel importante nos processos de maquinagem. As ferramentas de maquinagem são provavelmente uma das aplicações mais exigentes, que requerem características como dureza em temperaturas elevadas, alta resistência à abrasão, estabilidade química, tenacidade e rigidez (Fernandes et al., 2017; Gouveia et al., 2016; Nunes et al., 2017; Pinto et al., 2018). Além disso, o PVD também é capaz de produzir revestimentos com excelente adesão, camadas homogêneas, estruturas projetadas, morfologia controlada, alta diversidade de materiais e propriedades, entre outras características (Silva et al., 2017; Silva et al., 2012).

2.3.3.2.1 Técnica de deposição PVD

A sua flexibilidade e adaptabilidade às exigências do mercado levaram ao desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas para os diversos processos e assim

surgiram múltiplas variantes. A projeção catódica (*sputtering*) e a evaporação são os métodos PVD mais comuns para a deposições de filmes com espessuras muito finas (Baptista et al., 2018). Estes processos distinguem-se na forma como as partículas são aceleradas a partir do alvo em direção ao substrato. Na Figura 31 pode-se observar um diagrama esquemático com as principais variantes do processo PVD.

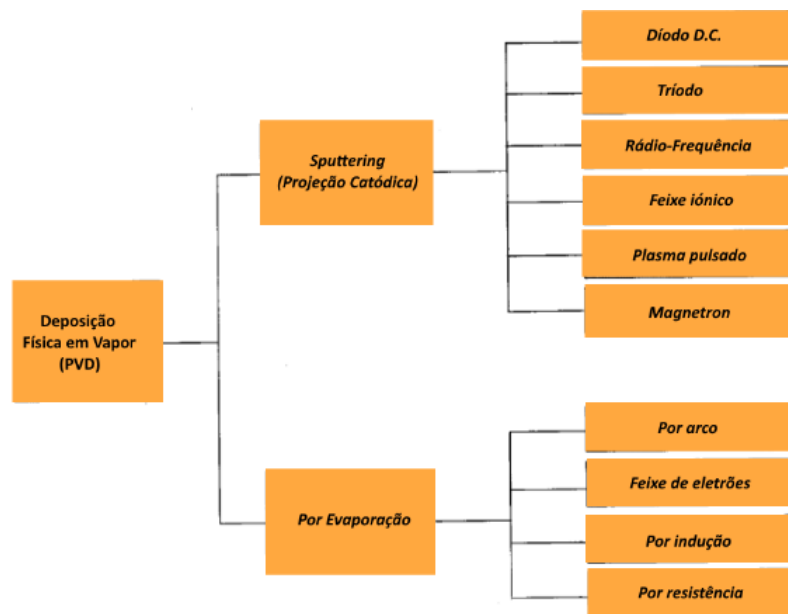


Figura 31 - Diagrama esquemático abreviado de algumas variantes do processo PVD (Holmberg et al., 2000)

No método de projeção catódica (*sputtering*), a ejeção do material a partir da fonte é provocada pelo bombardeamento da superfície do alvo por um gás iónico, acelerado por uma diferença de potencial aplicada entre o alvo e o substrato. Partículas de dimensão atómica provenientes do alvo são projetadas como resultado da energia cinética transmitida pelos iões de gás que incidem sobre o alvo. Estas partículas projetadas atravessam a câmara de deposição, e vão depositar-se violentamente sobre o substrato, ou sobre outras partículas já anteriormente projetadas, permitindo assim uma melhor compactação das partículas já presentes sobre o substrato. Este processo mecânico é importante pelos seguintes motivos (Mattox, 2003; Silva, 2001):

- Permite uma limpeza prévia das superfícies do substrato, através da expulsão de impurezas pelo efeito de choque das partículas atómicas projetadas do alvo;
- Conduz à formação de uma película de transição, entre o substrato e o revestimento, provocada pela mistura forçada/incrustação de átomos provenientes do alvo a velocidade elevada;
- Permite uma redistribuição contínua dos átomos já instalados na superfície do revestimento em formação, melhorando a densificação do filme.

No método de evaporação, o metal a depositar funciona como cátodo devido a um aquecimento provocado por indução, corrente eléctrica, feixe de eletrões ou arco

elétrico, e é sujeito a evaporação, ionização e aceleração das partículas em direção ao substrato. Existe normalmente uma polarização provocada por uma diferença de potencial aplicada entre o material a depositar e os substratos. Quando o gás é introduzido na câmara, verificam-se colisões entre as moléculas de gás e os iões metálicos, dando origem a compostos como, por exemplo, o nitreto de titânio (TiN), através de um processo complexo de reação, o que possibilita a formação de camadas sucessivamente comprimidas sobre o substrato, garantindo assim uma elevada adesão do filme ao substrato (Silva, 2001).

Note-se que neste processo, devido à trajetória assumida pelas moléculas gasosas no interior da câmara, só é possível efetuar deposições em que os substratos estejam diretamente expostos ao material do alvo. Deve ainda ser salientado que a velocidade de evaporação é independente da pressão, dentro da gama de pressões normalmente utilizadas no processo, já que as moléculas de ar existentes dentro da câmara, nestas condições, não impedem a libertação dos átomos do material a partir do alvo. A evaporação pode ainda apresentar problemas se houver tendência para a dissociação de materiais usados como alvo, caso estes sejam constituídos por mais do que uma substância. Este processo poderá originar algumas dificuldades quando o material a depositar apresenta um alto ponto de fusão, tornando-se necessária uma melhoria da ionização através de evaporação reativa (Holmberg et al., 2000; Martin, 2010; Mattox, 2003; Silva, 2001) .

A evaporação pode, no entanto, contar com outras formas de fornecimento de energia ao processo como, por exemplo, resistências elétricas, bobines de indução ou feixes de eletrões. Esta última fonte de energia apresenta muito maior potência comparativamente às demais, permitindo velocidades de deposição muito mais elevadas e um controlo de temperatura e taxa de deposição muito mais eficazes. Desta forma, o material no vácuo é fortemente acelerado e atraído pelo substrato, resultando numa maior taxa de deposição e melhor adesão (Silva, 2001). Na Figura 32 pode-se observar, esquematicamente, a forma como, cada um dos dois processos de deposição física de vapor abordados, procedem ao revestimento dos substratos.

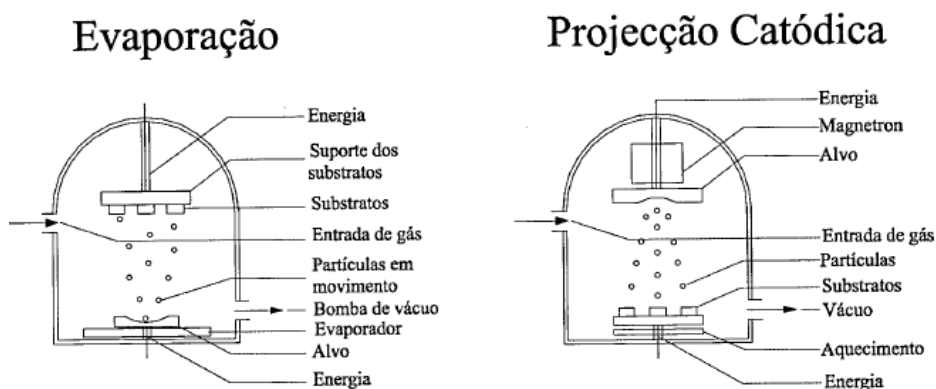


Figura 32 - Diagrama dos métodos de revestimento PVD de evaporação e de projecção catódica (Silva, 2001)

2.3.3.2.2 Diferentes materiais utilizados nos revestimentos PVD

O material depositado pode variar bastante consoante o propósito da sua aplicação. Por exemplo, os revestimentos de carbono tipo diamante (DLC) são perfeitamente apropriados para as mais extremas condições e altas velocidades de deslizamento, mesmo sem lubrificação. Além disso, estes revestimentos minimizam as perdas por atrito, o que os torna ideais para componentes do motor, como sistemas de injeção de combustível, conjunto de válvulas e pistões (Rajak et al., 2021). Outro exemplo são os revestimentos de nitreto de Crómio-Alumínio que, devido a serem revestimentos extremamente resistentes ao desgaste, com excelente dureza a quente e estabilidade perante choques térmicos, tornam-se revestimentos completos e de alto nível para aplicações de corte, puncionamento e fundição injetada (Oerlikon, 2022). Na Tabela 6 podem-se observar os revestimentos PVD mais utilizados.

Tabela 6 - Tratamentos de superfície – revestimentos usualmente aplicados aos componentes mais solicitados (Oerlikon, 2022)

Material do revestimento	Dureza revestimento HIT [GPa]*	Coefficiente de atrito no aço (seco)**	Temperatura máxima de serviço (°C)	Cor do revestimento
TiN (Nitreto de Titânio)	30 +/- 3	~0,6	600	Dourado
TiCN (Carbo-nitreto de Titânio)	37 +/- 3	~0,4	400	Cinza-azulado
AlCrN (Nitreto de Crómio-Alumínio)	36 +/- 3	~0,6	1100	Cinza
CrN (Nitreto de Crómio)	18 +/- 3	~0,5	700	Cinza-prateado
TiAlN (Nitreto de Alumínio-Titânio)	33 +/- 3	~0,6	900	Cinza-violeta
WC/C (Mistura de metal e Carbono tipo diamante)	13 +/- 3	~0,2	300	Antracite
DLC (Carbono tipo diamante)	20 +/- 3	~0,2	300	Preto

* Medido por nano-indentação de acordo com a norma ISO 14577. Para multicamadas, a dureza das diferentes camadas varia.

** Determinada pelo teste esfera no disco em condições a seco com uma esfera de aço de acordo com a norma ASTM G99. Durante a operação, os valores podem ser excedidos.

2.3.3.3 Shot peening

Outro processo de tratamento superficial para melhorar as propriedades mecânicas do aço é o *shot peening*. Os processos de *shot peening* são normalmente usados para melhorar as propriedades de fadiga dos aços. O *shot peening* introduz um campo de tensão residual compressivo na superfície próxima do aço, o que pode reduzir ou interromper o crescimento de fissuras relacionadas com a fadiga do material (Saklakoglu et al., 2021).

O *shot peening* também leva a mudanças na microestrutura do material, na morfologia da superfície e na isotropia das propriedades mecânicas (Yang et al., 2020). A tensão compressiva residual e deformação plástica são introduzidas na superfície do material pelo impacto em alta velocidade das microesferas de metal, que podem contrariar a tensão de tração produzida por cargas cíclicas mecânicas e, assim, melhorar significativamente o desempenho à fadiga dos materiais (Ling, 2006). Na Figura 33 encontra-se representado, esquematicamente, o princípio do processo de *shot peening*.

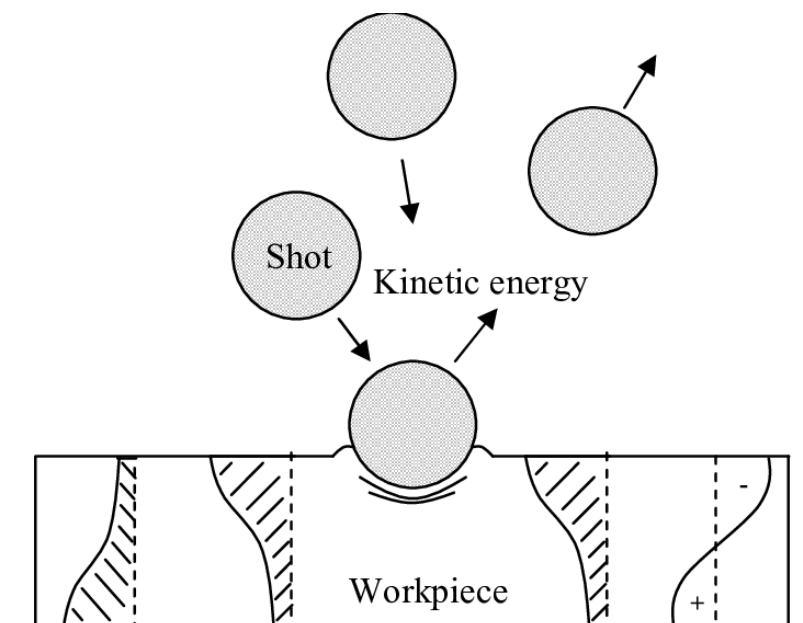


Figura 33 - Representação esquemática do processo de *shot peening* (Maawad et al., 2010)

2.3.3.4 Estado da arte

Os revestimentos e tratamentos superficiais evoluíram bastante ao longo das últimas décadas, sendo um processo imprescindível para as mais variadas aplicações. Na Tabela 7 encontram-se alguns estudos relevantes para a análise de diferentes tratamentos superficiais. Deste modo, é possível adquirir uma perspectiva de resultados que podem ser obtidos com diferentes revestimentos e tratamentos superficiais.

Tabela 7 - Estado de arte - Tratamentos e revestimentos superficiais

Referências bibliográficas	Descrição do trabalho
Antonetti et al., 2021	<p>O objetivo deste trabalho é apresentar aspectos básicos na área de revestimentos metálicos, com ênfase nos processos de cromagem, niquelagem, zincagem e estanhagem. Os resultados indicam que os revestimentos possuem diversas vantagens sob os processos convencionais de prevenção contra a corrosão. No entanto, estes revestimentos também possuem desvantagens como a geração de efluentes líquidos e gasosos que, ao serem libertados no ambiente, geram impactos ambientais severos.</p>
van Doan et al., 2017	<p>No que diz respeito ao esforço para substituir a cromagem a duro por causa dos seus problemas ecológicos, este artigo investiga os efeitos dos revestimentos superficiais na resistência ao desgaste do aço ISO 42CrMo4. As amostras experimentais foram tratadas pelas tecnologias de nitrocarburação, cromagem a duro e nitruração a plasma. A nitruração a plasma foi realizada com diferentes misturas gasosas a 500°C por 15 horas. Foi realizado um teste de desgaste para avaliar o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste. Os resultados foram complementados com testes de dureza superficial e avaliação metalográfica. Os resultados deste estudo apontam que a nitrocarburação e a nitruração a plasma aumentam de forma mais significativa a resistência ao desgaste do que a cromagem a duro.</p>
Baptista et al., 2018	<p>Este estudo tem como objetivo proceder a uma revisão quanto às melhorias já estudadas para otimizar o processo de <i>sputtering</i> PVD, tentando relacionar essas melhorias com os requisitos industriais em função do desenvolvimento do produto e as exigências do mercado. Neste trabalho concluiu-se que a otimização do consumo de energia dos processos PVD é uma oportunidade de melhoria. Esta melhoria pode ser obtida na etapa de deposição, uma vez que é nessa etapa do processo que o PVD apresenta um maior consumo. No processo CVD representa 33,5% do consumo energético, enquanto no processo PVD representa 77,7%.</p>

-
- Fernandes et al., 2017
- Neste artigo identificou-se o principal mecanismo de desgaste desenvolvido nas superfícies principais de uma ferramenta de estampagem, caracterizada pela chapa de aço revestida a estanho, utilizada nas embalagens. Testaram-se dois revestimentos PVD avançados (B4C e Mo) e conseguiu-se uma melhoria do comportamento de desgaste do punção e matriz. Os resultados obtidos com alguns dos revestimentos testados confirmam que é possível minimizar a transferência de estanho da chapa de aço revestida para a matriz e punção, pelo que se garante uma maior vida útil desses componentes.
-
- Gouveia et al., 2016
- Neste trabalho avaliou-se o desempenho de maquinagem de diferentes ferramentas, analisando o comportamento e os mecanismos de desgaste com dois comprimentos de corte diferentes, mantendo constante a trajetória de maquinagem. Foram testadas ferramentas com diferentes números de dentes e revestimentos superficiais, analisando o comportamento de desgaste de cada comprimento de corte por meio de microscopia eletrónica de varrimento, de modo a identificar o desempenho do desgaste e como cada revestimento contribui para o aumento da vida útil da ferramenta. Apesar da grande evolução dos revestimentos à base de AlCrN, este trabalho mostra que o TiAlN é o revestimento mais eficaz no corte de materiais resistentes, como os aços inoxidáveis duplex.
-
- Nunes et al., 2017
- Neste estudo, foram selecionados dois moldes com problemas típicos de desgaste severo, e os mecanismos de desgaste envolvidos foram profundamente estudados. De seguida, realizou-se uma seleção criteriosa do melhor revestimento para este fim e algumas das partes mais críticas do molde foram revestidas a fim de testar possíveis vantagens da aplicação do revestimento, analisando o comportamento da resistência ao desgaste e os mecanismos de desgaste envolvidos. Os resultados obtidos permitiram concluir que o revestimento Ti40Al60N apresenta um comportamento melhor que o Ti50Al50N neste campo de aplicação, devido a apresentar um menor coeficiente de atrito e melhor resistência ao desgaste.
-

-
- Silva et al., 2017
- Este trabalho procura melhorar a resistência ao desgaste de moldes para injeção de plásticos reforçados com fibra de vidro, de modo que se comparam quatro diferentes revestimentos finos e duros obtidos pelo processo PVD *sputtering*: TiAlN, TiAlSiN, CrN/TiAlCrSiN e CrN/CrCN/DLC. Para realizar a caracterização tribológica, foram selecionadas duas abordagens diferentes: um método laboratorial, usando testes de desgaste por microabrasão, e um modo industrial, analisando a resistência ao desgaste das amostras revestidas quando inseridas num molde de injeção de plástico. A melhor resistência ao desgaste nos testes de desgaste laboratorial foi obtida pelo revestimento de TiAlN, enquanto o melhor desempenho nos testes de desgaste industrial foi obtido pelo revestimento CrN/TiAlCrSiN.
-
- Silva et al., 2012
- Este trabalho focou-se no estudo das propriedades tribológicas de filmes finos de TiB₂ usando testes de microabrasão e seguindo a norma BS EN 1071-6:2007. Devido à alta dureza normalmente patenteada por esses filmes, o diamante foi selecionado como abrasivo em testes de microabrasão. Foi estudada a relação entre dureza, resistência ao desgaste e coeficiente de desgaste, mostrando que os revestimentos de TiB₂ apresentam excelentes propriedades para aplicações tribológicas.
-
- Silva, 2001
- Este trabalho pretendeu encontrar as melhores condições de síntese de diamante em substratos ferrosos, procedendo seguidamente a testes tribológicos de avaliação das eventuais vantagens fornecidas por este tipo de revestimento. A síntese do diamante foi efetuada por MPCVD (*Microwave Plasma Chemical Vapour Deposition*). A sua morfologia e qualidade foram avaliadas por microscopia eletrónica de varrimento, rugosimetria e espectroscopia Raman. Os testes tribológicos foram realizados num equipamento de micro-abrasão e a avaliação do desgaste foi analisada por microscopia ótica, microscopia eletrónica de varrimento e rugosimetria. Este trabalho permitiu determinar as condições com melhores resultados das seguintes áreas: substratos, filmes intermédios, condições de deposição e taxa de crescimento.
-

Saklakoglu et al., 2021

Este estudo investigou experimentalmente o efeito do *shot peening* nas propriedades de fadiga de ligas do aço 50CrV4 com diferentes defeitos superficiais artificiais. Foram utilizadas ferramentas de furação para introduzir diferentes defeitos artificiais com raios de 0,585 mm e 0,895 mm na superfície das amostras. O *shot peening* foi aplicado nas amostras perfuradas e não perfuradas. Foram realizadas observações de microscopia eletrônica de varrimento, medições de microdureza e tensão residual por difração de raios X para analisar as características das amostras sujeitas ao tratamento de *shot peening* e também as amostras que não foram tratadas. Os resultados mostraram que o *shot peening* leva à transformação da austenita retida em martensite na microestrutura próxima à superfície. As taxas de dureza da superfície e perto da superfície aumentaram em 8% após o *shot peening*.

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Caracterização das entidades envolvidas
- 3.2 Abordagem ao trabalho a realizar
- 3.3 Análise de *benchmarking* de ferramentas de cravação
- 3.4 Caracterização de ferramentas de cravação em diferentes etapas do processo produtivo
- 3.5 Caracterização de ferramentas de cravação sujeitas a ciclos de utilização
- 3.6 Discussão de resultados

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Caracterização das entidades envolvidas

3.1.1 Entidade acolhedora

Fundada em 1978 por Ricardo Moreira da Silva e Sérgio dos Santos Barbosa, a Ricardo & Barbosa é uma das maiores referências portuguesas na fabricação de componentes de alta precisão, fornecendo, principalmente, a indústria automóvel, indústria de semicondutores, moldes e ferramentas de estampagem progressiva. A R&B fornece ferramentas para empresas produtoras de cablagem automóvel há mais de 40 anos. Na Figura 34 é observável alguns dos produtos produzidos pela R&B. A Figura 34a) representa um exemplo das várias peças feitas por encomenda. Neste caso o cliente envia todas as especificações da peça que pretende receber e a R&B apenas fica responsável pela produção da mesma. Na Figura 34b) está o exemplo de um projeto feito por encomenda, neste caso uma ferramenta de estampagem. Neste tipo de encomendas a R&B é responsável pelo design e desenvolvimento, e posteriormente também responsável pela produção. Na Figura 34c) apresenta-se um dos aplicadores de marca R&B, sendo o seu desenvolvimento e produção efetuados inteiramente pela Ricardo & Barbosa.

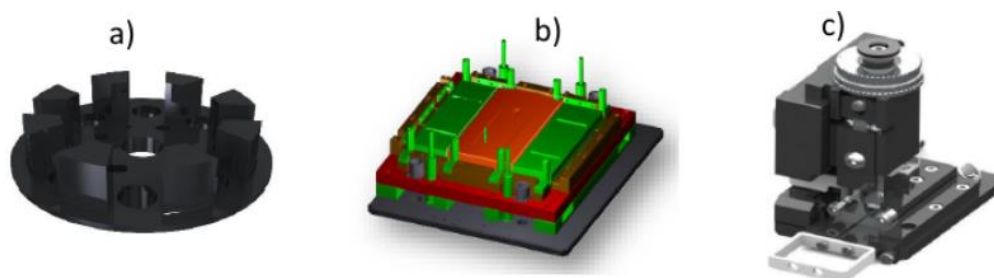


Figura 34 - Exemplos de produtos produzidos pela R&B - a) Peças feitas por encomenda; b) projetos feitos por encomenda; c) Aplicador de marca R&B (R&B, 2022)

Sediada em S. Pedro da Cova, Gondomar, a Ricardo & Barbosa conta com duas instalações de produção, uma em Portugal e outra no México, estando atualmente presente em 26 países ao redor do mundo. As instalações em Portugal possuem cerca de 160 trabalhadores e a sua área de implementação é 3040 m². A fábrica no México possui cerca de 52 trabalhadores e uma área de 900 m². Em ambas as fábricas estão implementados 3 turnos de 8 horas, o que permite à R&B uma elevada capacidade produtiva. Existe ainda em cada uma das instalações uma unidade de investigação e

desenvolvimento, o que permite à R&B oferecer soluções únicas e inovadoras aos seus clientes. Na Figura 35 observam-se as atuais instalações da Ricardo & Barbosa e na Tabela 8 é possível verificar o número de máquinas em cada uma das instalações.



Figura 35 - Instalações atuais da R&B - a) Instalação de Portugal; b) Instalação do México (R&B, 2022)

Tabela 8 - Número de máquinas em cada uma das instalações da R&B

Portugal	México
17 Fresadoras CNC (5, 4 e 3 eixos)	4 Fresadoras CNC (4 e 3 eixos)
4 Fresadoras convencionais	2 Retificadoras planas convencionais
5 Tornos CNC (9 e 3 eixos)	3 Centros de erosão de fio
4 Tornos convencionais	1 Centro de erosão de penetração
4 Retificadoras planas CNC	1 centro de polimento automático de diamante
8 Retificadoras planas convencionais	1 Centro de gravação a laser
2 Retificadoras cilíndricas CNC	
2 Retificadoras cilíndricas convencionais	
1 Retificadora CNC de perfis PeTeWe	
11 Centros de erosão de fio	
3 Centros de erosão de penetração	
1 Centro de polimento automático de diamante	
1 Centro de jato de areia	
2 Centros de gravação a laser	
1 Controladora CMM	

Este vasto arsenal de maquinaria permite à R&B ser capaz de trabalhar com todos os tipos de metais, como o metal duro, o titânio, ligas à base níquel e também aços duplex. Para além da sua capacidade interna, conta com vários parceiros de longa data, que permite oferecer várias soluções no que toca a tratamentos térmicos e superficiais, e operações como o corte de laser e corte de jato de água.

Toda esta capacidade torna a R&B uma referência no fabrico de componentes para as indústrias automóvel, eletrónica, energética, petrolífera e de gás e aeronáutica. Internamente, é feita uma divisão entre duas áreas: mecânica de precisão e cablagem. Na Figura 36 pode-se observar como se distribuíram as vendas da R&B no ano 2018.

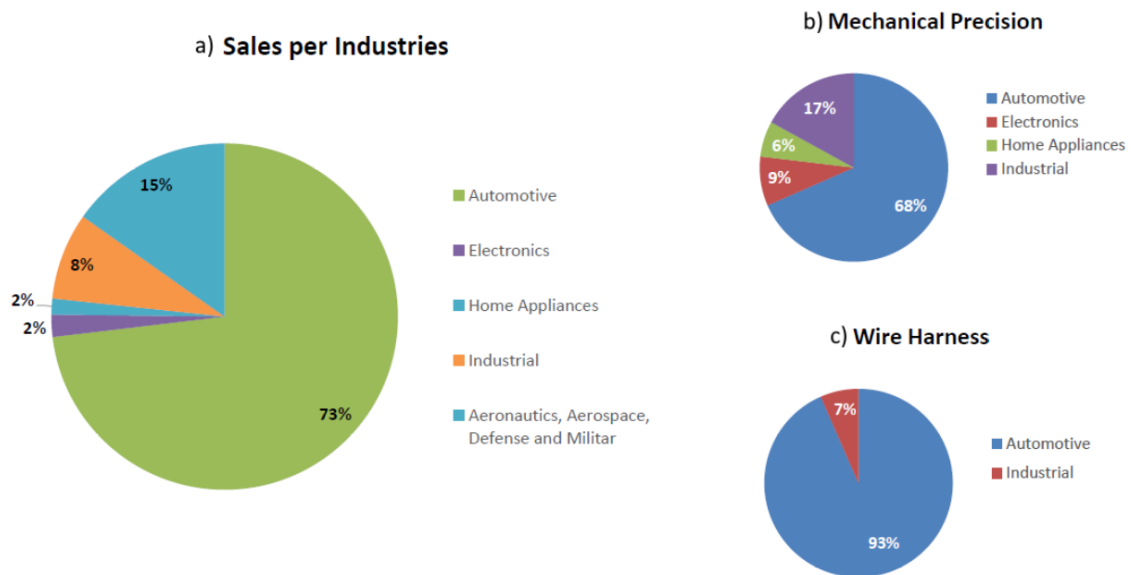


Figura 36 - Distribuição das vendas em 2018 - a) Vendas por indústria; b) Distribuição das vendas por indústria da mecânica de precisão; c) Distribuição das vendas por indústria da cablagem (R&B, 2022)

Perante um mercado cada vez mais exigente e competitivo, a R&B implementou em 2000 um sistema de Qualidade através da certificação na norma NP EN ISO9001:2000. Com as questões ambientais na ordem do dia, o conceito de Qualidade tem sido alargado a todas as vertentes da atividade da empresa entre as quais se inclui a proteção do Ambiente. Por este motivo, a Ricardo & Barbosa, Lda certificou-se na norma NP EN ISO14001:2004 em 2003. No ano 2017, com o intuito de se preparar para o mercado da aeronáutica, a R&B obteve a certificação NP EN ISO AS9100:2016 (R&B, 2022).

3.1.2 Entidade parceira

O INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial é um Centro de Interface Tecnológico, criado em 1986, está vocacionado para a realização de atividades de investigação e de inovação de base tecnológica, transferência de tecnologia, consultoria e serviços tecnológicos, orientadas para o

desenvolvimento da indústria e da economia em geral. O INEGI é uma Instituição de utilidade pública, privada, sem fins lucrativos.

A estrutura organizativa deste instituto assenta em três pilares de especialização da atividade: investigação e desenvolvimento; inovação e transferência de tecnologia; e consultoria e serviços. A sua missão é contribuir para o desenvolvimento da indústria e da economia em geral, através da inovação de base científica e tecnológica, garantindo ao mesmo tempo o desenvolvimento pessoal e profissional dos colaboradores e o enriquecimento do ensino superior.

A infraestrutura do INEGI divide-se em três secções: laboratórios; fábricas experimentais; e ferramentas de engenharia. Na secção de laboratórios pode-se encontrar estações de ótica e mecânica experimental, materialografia, ensaios mecânicos, análise de processos avançados de ligação, entre outros. Nas fábricas experimentais encontram-se estações para fabrico aditivo, processos avançados de fundição, trabalho de metais por corte e conformação e centros de maquinaria CNC. Na secção de ferramentas de engenharia é possível a simulação de escoamentos atmosféricos, simulação de processos de fundição, injeção de polímeros, conformação plástica e maquinaria, entre outros (INEGI, 2022). Na Figura 37 pode-se encontrar alguns dos números chave do INEGI do ano 2021.

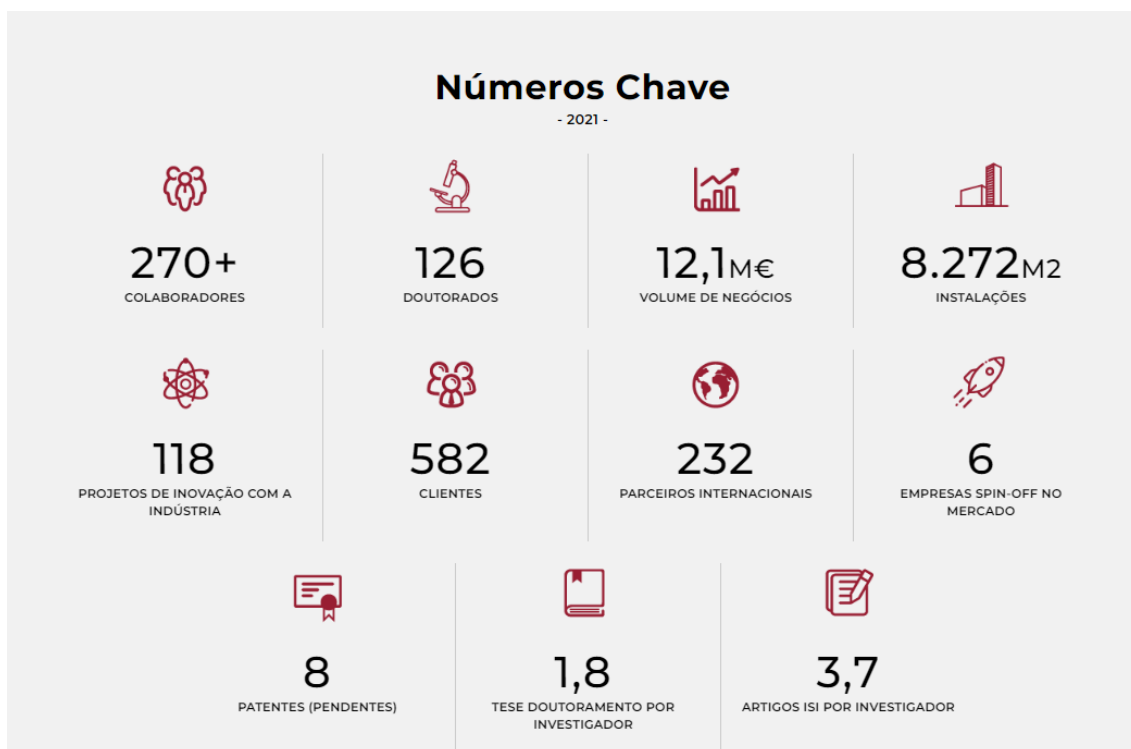


Figura 37 - Números chave do INEGI em 2021 (INEGI, 2022)

3.2 Abordagem ao trabalho a realizar

3.2.1 Metodologia utilizada

No desenvolvimento deste trabalho prático foi utilizada a metodologia DSR. Esta abordagem é normalmente utilizada para desenvolver e melhorar novos conceitos, a partir de outros já existentes (Abdullah et al., 2020; Sousa et al., 2022; Tamada et al., 2020). Esta metodologia envolve o estudo detalhado de processos existentes e a proposta de novas soluções, o que conduz a uma melhoria do processo que poderá ser usado em diferentes aplicações (Barbosa et al., 2022). Uma vez que, neste trabalho prático, as amostras em estudo foram produzidas com materiais e revestimentos já aplicados noutro tipo de ferramentas, a metodologia DSR foi adotada. Na Tabela 9 é possível observar as seis etapas desta metodologia:

Tabela 9 - Descrição de cada etapa da metodologia DSR (Sousa et al., 2022)

Etapa	Descrição
Identificação do problema	Análise do processo atual, descrição das suas limitações e aspetos a melhorar
Definir objetivos para a solução	Definir vários objetivos/requisitos para a solução dos problemas anteriormente identificados
Design e desenvolvimento	Escolha de novas soluções, com base nos objetivos e requisitos anteriormente definidos
Demonstração da solução	Implementação da solução desenvolvida
Avaliação da solução	Avaliar o desempenho da solução implementada, verificando se os objetivos/requisitos são cumpridos
Conclusões	Avaliação final da solução, através da comparação entre a nova solução implementada e o processo anterior

Como é possível verificar na Tabela 9, o projeto começa com a avaliação do processo atual, onde se identificam possíveis problemas/melhorias. Esta etapa do processo pode ser observada nos capítulos 3.2.2 e 3.2.3. Na secção 3.2.4 são definidos os vários objetivos que se pretende que a solução alcance, e, de seguida, no capítulo 3.2.5 encontra-se o *brainstorming*, onde foi definido que amostras deveriam ser produzidas e testar como possíveis soluções. Entre os capítulos 3.3 e 3.5, inclusive, decorrem as etapas seguintes da metodologia DSR, a demonstração e avaliação de possíveis

soluções. Finalmente, nos capítulos 3.6 e 4, apresenta-se a fase final desta metodologia, as conclusões. Nesta fase é realizada uma avaliação final das soluções testadas e ainda se sugerem possíveis trabalhos futuros.

3.2.2 Caracterização do processo atual

Atualmente, os punções de cravação da Ricardo & Barbosa já são uma referência nacional e mundial para empresas produtoras de cablagens elétricas do ramo automóvel, tendo no seu leque de clientes empresas como a Yazaki, a Aptiv, a Leoni, a Lear e a Sumitomo. Isto deve-se ao produto de qualidade fabricado pela R&B e também pelos seus preços competitivos. No entanto, pretende-se conseguir obter um produto com uma qualidade ainda superior às ferramentas atualmente produzidas e para isto é necessário analisar o processo atual e identificar possíveis problemas/melhorias.



Figura 38 - Ferramentas de cravação atuais da Ricardo & Barbosa montadas num aplicador

Neste momento, a Ricardo & Barbosa produz várias dezenas de diferentes ferramentas de cravação para os mais diversos clientes, todas estas com geometrias diferentes. Apesar dos diferentes *designs*, a grande maioria dos punções seguem o mesmo princípio no que diz respeito ao seu fabrico, com exceção de alguns pedidos especiais de determinados clientes. Neste momento os materiais utilizados nos *crimping dies* da R&B são o AISI S7 e o AISI H13, um aço para ferramentas resistente ao choque e o outro para trabalho a quente, respetivamente. Estes são utilizados devido às suas excelentes características mecânicas e aos resultados e *feedbacks* fornecidos pelos clientes ao longo dos anos. Numa fase mais avançada da sequência de fabrico dos punções de cravação é ainda aplicado um revestimento de crómio-duro para melhorar o desempenho e durabilidade das ferramentas de cravação. Os materiais utilizados atualmente não podem ser considerados um problema devido aos resultados obtidos ao longo dos últimos, como mencionado anteriormente, no entanto, não se descarta a

possibilidade de melhorias neste ponto. No que diz respeito ao revestimento de crómio duro utilizado, neste momento ainda não representa um problema, mas poderá vir a ser no futuro, uma vez que está a ser cada vez mais evitado devido a pressões reguladoras, que se devem à natureza tóxica do crómio duro hexavalente. Existe ainda a forte possibilidade de melhorias em relação ao revestimento, visto que atualmente existem processos bastante mais avançados do que a cromagem a duro.

Analisados os materiais e revestimentos utilizados, é importante agora examinar a gama operatória do fabrico de uma ferramenta cravação. A primeira operação na produção de um punção de cravação é o corte do material. A R&B possuiu um vasto *stock* de barras em AISI S7 e AISI H13 com as dimensões mais comuns dos vários *crimping dies* produzidos para diferentes clientes, o que otimiza toda a sequência operatória. Posteriormente segue-se a operação de fresagem, que aproxima o punção da sua forma final, deixando geralmente uma sobredimensão de alguns décimos do milímetro. Na Figura 39 pode-se observar um dos centros de maquinagem CNC, onde os punções da R&B são maquinados.



Figura 39 - Centro de maquinagem CNC da R&B

O passo seguinte é o tratamento térmico da peça, sendo este realizado da seguinte forma:

- **Têmpera:** Austenitização entre os 925°C e os 960°C, durante 15 a 45 minutos e posterior arrefecimento em azoto;
- **Revenidos:** São realizados três revenidos entre os 200°C e os 280°C, dependendo da dureza solicitada.

O tratamento térmico realizado pode variar devido a fatores como a dimensão dos punções de cravação e a dureza do material pedida pelo cliente. Normalmente a dureza dos punções de cravação estão entre os 54 e 57 HRC. Podem ser utilizadas

temperaturas de revenido mais elevadas (até aos 620°C) para durezas mais baixas às habitualmente solicitadas. Esta informação do processo atual de tratamento térmico foi fornecida pelo habitual fornecedor da Ricardo & Barbosa, o Ramada Aços, sendo um pouco genérica, pois estes não pretendem partilhar detalhes do seu próprio tratamento. Esta etapa do processo tem uma grande importância no produto final, pois se a dureza final obtida não for a mais adequada, a qualidade do produto final ficará bastante comprometida.

Após o tratamento térmico, os punções de cravação são retificados numa retificadora plana, de modo a retirar os empenos resultantes do tratamento térmico, a colocar o punção nas suas dimensões finais (espessura, largura e comprimento) e ainda para melhorar o seu acabamento superficial. Na Figura 40 pode-se observar uma das retificadoras planas da R&B, já com alguns punções no seu prato magnético prontos para retificar os punções até à espessura desejada.



Figura 40 - Retificadora plana da R&B

De seguida segue-se a operação de eletroerosão de fio, onde é feita a geometria da zona funcional dos punções, a zona de cravação. A eletroerosão de fio é um processo de maquinagem especial no qual, ao contrário dos métodos mais convencionais, a remoção do material não é obtida pelo contato mecânico entre uma ferramenta de corte e a peça, mas sim pela descarga elétrica que percorre um elétrodo em formato de fio. Esta descarga elétrica forma uma camada branca (camada superficial que funde ou vaporiza com a descarga elétrica do processo de fabrico), que diminui a resistência mecânica dos materiais e dificulta a adesão do revestimento superficial que será posteriormente realizado, sendo necessária remover a mesma. Na Figura 41 tem-se um dos centros de eletroerosão de fio da R&B, podendo-se observar na Figura 42 o tanque com água onde são imersas as peças a serem trabalhadas e ainda o elétrodo em formato de fio.



Figura 41- Centro de erosão de fio da R&B



Figura 42 - Interior de um centro de erosão a fio

A operação de erosão de fio não pode ser evitada, visto que na grande maioria das ferramentas o design e rigor geométrico pretendidos só podem ser obtidos através desta operação. Posto isto, a operação que sucede o processo de erosão de fio, tem uma elevada importância, pois deverá conseguir remover a camada branca da forma mais eficaz possível e obter um excelente acabamento superficial antes de se aplicar o revestimento. Atualmente, a solução utilizada é o jato de areia. Esta operação consiste na projeção de microesferas de vidro sobre a superfície da peça, após inserção do componente na câmara por parte do operador. A dureza e forma esférica das microesferas de vidro permitem remover impurezas e oxidações, sem danificar as superfícies acabadas. O vidro não reage quimicamente com outros materiais, pelo que as microesferas não criam corrosão nas superfícies acabadas, sem depósito de

substâncias estranhas (Graphite, 2017). As microesferas utilizadas pela R&B possuem uma granulometria entre 100 a 200 μm e possuem as propriedades físicas e composição química indicadas na Figura 43. Na Figura 44 observa-se o interior de uma câmara onde é realizado a operação de jato de areia.

a) PROPRIEDADES FÍSICAS		b) COMPOSIÇÃO QUÍMICA	
Ponto de fusão	730°C	SiO ₂	70 a 75%
Ponto de recozimento	550°C	Na ₂ O	13 a 15%
Peso específico	2,46 g/cm ³	K ₂ O	<1,5%
Índice de refração	1,51 – 1,52	CaO	7 a 12 %
Densidade aparente	1,50 – 1,60	MgO	<5%
Dureza Mohs	6	Fe ₂ O ₃	<0,5%
Dureza Rockwell	47 RC	Al ₂ O ₃	<2,5%
Dureza Knop (100g)	515 kg/mm ²	SO ₃	<0,5%
Partículas angulares	máximo de 3% em número		

Figura 43 - Características das microesferas de vidro usadas pela R&B: a) Propriedades físicas; b) Composição química (Graphite, 2017)



Figura 44 - Jato de areia da R&B

Após o tratamento de jato de areia, com a camada branca já removida, segue-se a operação de cromagem a duro. Nesta etapa é importante garantir um revestimento uniforme, principalmente na zona funcional do punção, e ainda garantir que não existem impurezas que prejudiquem a adesão do revestimento ao substrato. Posteriormente, os punções são gravados e é realizado um controlo dimensional final. Na Figura 45 é observável a zona funcional de um punção de cravação já acabado. É possível verificar o excelente acabamento da zona que efetua a cravação, muito devido à precisão das operações realizadas e principalmente devido ao revestimento em cromo-duro. Na Figura 46 encontra-se o mesmo punção lado a lado com o desenho técnico pronto a passar pelo controlo dimensional final. Por último, após ser realizado

o controlo dimensional e verificado que os punções estão em conformidade com o pedido, estes seguem para o cliente, onde irão substituir os *crimping dies* anteriormente montados nos seus aplicadores.



Figura 45 - Zona funcional de um punção de cravação

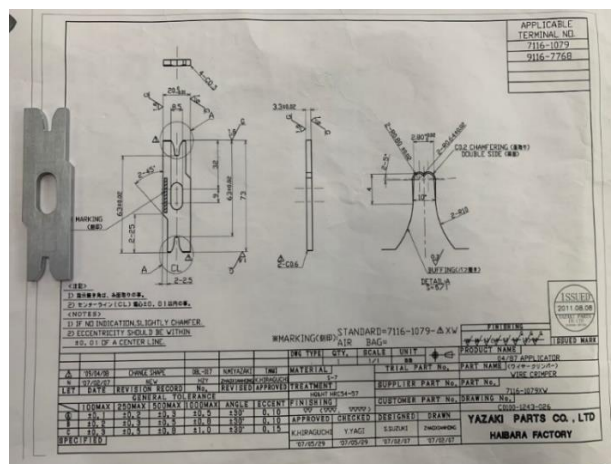


Figura 46 - Punção de cravação e o seu desenho técnico

3.2.3 Identificação de problemas e possíveis melhorias

Depois de analisar toda a sequência de fabrico de uma ferramenta de cravação e os materiais e revestimentos utilizados atualmente, é possível identificar os seguintes problemas e pontos com potencial melhoria:

- Possibilidade de existência de fragilidades mecânicas, pobre adesão e camada pouco uniforme do revestimento, devido à presença da camada branca e outras possíveis impurezas na zona funcional do punção;
- Hipótese de, em determinadas ocasiões, a dureza após têmpera do material base não ser a mais adequada;
- Forte probabilidade de melhorias em relação ao revestimento aplicado;

- Potencial melhoria do processo que sucede a operação de erosão de fio, conduzindo a melhores acabamentos superficiais e a uma remoção mais eficaz da camada branca;
- Possível melhoria do material base utilizado.

3.2.4 *Objetivos*

O principal objetivo da presente dissertação é produzir punções de cravação de terminais elétricos com maior tempo de vida útil, sem aumentar significativamente o custo destas ferramentas. Para atingir este objetivo é necessário cumprir os seguintes requisitos/objetivos:

- Conseguir uma remoção eficaz da camada branca formada na operação de erosão de fio, eliminando todas as impurezas que poderão fragilizar o componente, e garantir que o acabamento final da zona funcional é o mais fino possível;
- Garantir uma excelente adesão do revestimento ao substrato e uma camada uniforme do mesmo ao longo da zona funcional;
- Encontrar revestimentos economicamente e funcionalmente fiáveis, que possam ser utilizados como alternativa ao crómio-duro;
- Estudar possíveis alternativas aos materiais utilizados atualmente;
- Confirmar que o tratamento térmico realizado é o mais adequado e que são obtidas as durezas finais desejadas;
- Ultrapassar os 200 000 ciclos de cravação por punção.

3.2.5 *Brainstorming*

Várias sessões de *brainstorming* foram realizadas em diferentes fases, de modo a encontrar possíveis soluções aos problemas identificados, capazes de cumprir os requisitos e atingir os objetivos anteriormente estabelecidos. Esta metodologia é uma excelente ferramenta de qualidade, necessária para resolver problemas complexos envolvendo uma equipa (Rodrigues et al., 2020). Assim, a equipa que desenvolveu as sessões de *brainstorming* foi constituída por sete pessoas: responsável de operações, líder do departamento de industrialização, gestor de produção, dois membros do INEGI e três líderes de equipa.

Para cada problema identificado, através do estudo do processo atual, era realizada uma análise através de *brainstorming* onde era praticado um teste de restrição e fiabilidade a cada ideia que surgia. Se a ideia tivesse sucesso nas análises era implementada, caso contrário era rejeitada e o ciclo era repetido para obter uma nova ideia. Na Figura 47 é possível observar uma representação esquemática da análise realizada às várias ideias que surgiram.

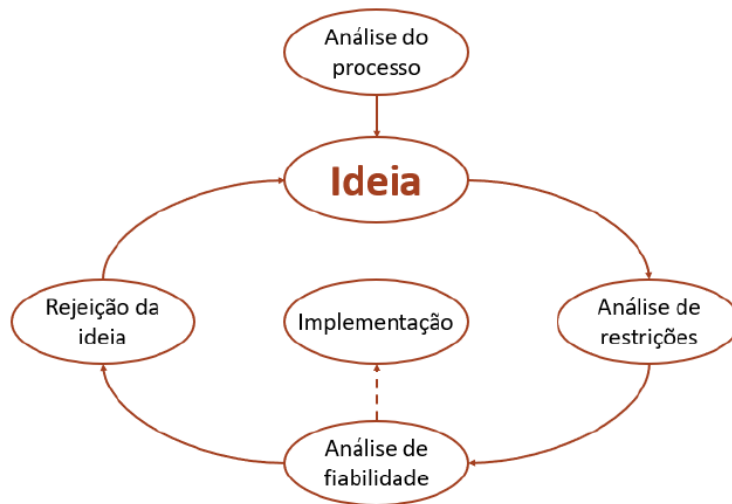


Figura 47 - Brainstorming de análise e implementação de ideias

As ideias que se decidiram implementar ao longo das várias sessões de *brainstorming* foram as seguintes:

- **Recolher amostras dos concorrentes diretos da R&B** – Decidiu-se recolher amostras dos concorrentes, de modo a tomar conhecimento em relação aos materiais e revestimentos utilizados pela concorrência;
- **Produzir amostras com revestimento PVD** – Produziram-se três amostras de ferramentas de cravação, nas quais foi aplicado um revestimento PVD. O material do revestimento escolhido foi o nitreto de titânio (TiN), devido a este oferecer uma excelente proteção contra o desgaste, permitindo uma redução eficaz do desgaste abrasivo e adesivo, alguns dos principais desafios à durabilidade das ferramentas em estudo. O principal motivo para a escolha de um revestimento à base de TiN, ao invés de outro material, recaiu principalmente sobre o fato deste ser economicamente mais competitivo;
- **Produzir ferramentas com tratamento *shot peening*** – Foram produzidas também duas amostras que, após a operação de erosão de fio, foram sujeitas ao tratamento de *shot peening*. Decidiu-se testar este tratamento superficial porque, para além de este melhorar significativamente o desempenho à fadiga dos materiais, poderia ser também uma solução para a remoção da camada branca. Desta forma, se este tratamento fosse bem-sucedido, iria funcionar como um “dois em um”;
- **Analisar o impacto da camada branca na zona funcional das ferramentas** – Realizaram-se ensaios de caracterização em ferramentas saídas diretamente do processo de erosão de fio e outras após a operação de jato de areia, todas sem qualquer revestimento superficial. Esta análise irá permitir perceber a importância da operação que segue a erosão de fio e a forma como a camada branca afeta a zona funcional das ferramentas de cravação.

Com a cooperação do INEGI, todas as amostras produzidas serão sujeitas a diversos ensaios de caracterização, de modo a recolher a maior quantidade de informação possível, permitindo escolher a melhor solução. Decidiu-se dividir estes ensaios de caracterização em três fases:

- **Análise de *benchmarking* de ferramentas de cravação** - Nesta etapa estudaram-se as amostras recolhidas de clientes e ainda as amostras produzidas pela Ricardo & Barbosa;
- **Caracterização de amostras em diferentes etapas do processo produtivo** – Nesta fase foram analisadas ferramentas de cravação em diferentes fases do processo produtivo. Analisaram-se amostras saídas diretamente da erosão de fio e outras depois de sujeitas ao tratamento de jato de areia, de modo a se estudar o impacto da oxidação na superfície de cravação;
- **Caracterização de ferramentas sujeitas a ciclos de cravação** – Nesta fase fabricaram-se novas amostras, já com melhorias implementadas devido à informação obtida nas análises anteriores. Estas amostras foram sujeitas a vários ciclos de cravação. Posteriormente, realizaram-se vários ensaios de caracterização com o objetivo de estudar e quantificar o desgaste da ferramenta ao longo do seu ciclo de vida, assim como avaliar a preservação das soluções de revestimento superficial e melhorias de processo adotadas nas ferramentas.

3.3 Análise de *benchmarking* de ferramentas de cravação

3.3.1 *Procedimento experimental*

Após contacto com o cliente Yazaki, conseguiu-se recolher nove ferramentas de três fornecedores concorrentes: Ozturk, Mecal e Hibara. Conforme mencionado anteriormente, foram ainda produzidas cinco amostras por parte da R&B. A Tabela 10 apresenta a totalidade das ferramentas de cravação fornecidas pela empresa Ricardo & Barbosa ao INEGI, e respetiva referência, destinadas à execução do estudo de caracterização de *benchmarking*. O número de cada amostra foi atribuído à medida que esta foi recolhida/produzida, seguindo assim uma ordem cronológica. Não existia grande informação em relação aos materiais e tratamentos utilizados no fabrico das ferramentas de cravação da concorrência, pelo que a informação indicada neste momento carece de confirmação através dos métodos de caracterização que serão aplicados posteriormente.

Tabela 10 - Identificação das amostras submetidas a análise

Amostra Nº	Fabricante	Referência	Material	Tratamento superficial
1	Ozturk	7116-5678-XA	(?)	(?)
2	Mecal	7116-2063PA	(?)	(?)
3	Hibara	71268852PA	(?)	(?)
4	R&B	7116-6633XA	AISI H13	Balinit A
5	Mecal	7006-6605 CWM	AISI 420	(?)
6	R&B	7114-6479XW	AISI H13	Balinit A
7	R&B	7114-6479XW	AISI H13	Balinit A
8	Mecal	10228387	(?)	(?)
9	Mecal	L77M3124714	(?)	(?)
10	R&B	7116-4027DD XW	AISI S7	<i>Shot peening</i>
11	R&B	7116-4027DD XW	AISI S7	<i>Shot peening</i>
12	Hibara	71268852P1	(?)	(?)
13	Mecal	7009-6605 CIM	(?)	(?)
14	Mecal	10228536	(?)	(?)

Foram extraídas duas amostras de cada ferramenta de cravação, uma correspondente à zona funcional da ferramenta (corte A) e outra referente a uma zona não útil (corte B). Os respectivos cortes realizados encontram-se identificados na Figura 48.

As ferramentas de cravação e respectivas amostras foram submetidas a diversos ensaios de caracterização, com os seguintes objetivos:

- Espectrometria de emissão ótica – Análise da composição química dos materiais base e determinação do tipo de aço;
- Ensaios de dureza – Determinação das durezas dos materiais base;
- Microscopia ótica – Visualização da presença de revestimentos, determinação da sua espessura e análise qualitativa da sua adesão ao substrato;

- Microscopia eletrônica de varrimento de alta resolução com microanálise por raios-X (SEM/EDS) – Análise semi-quantitativa da composição química dos materiais base e determinação da espessura e natureza de revestimentos (análise semi-quantitativa da sua composição, uniformidade e observação da adesão ao substrato).

A determinação da composição química em espectrometria de emissão ótica foi executada nas ferramentas após lixagem da sua superfície, com o intuito de eliminar possíveis revestimentos. A determinação das durezas e as análises em microscópio ótico e SEM/EDS foram concretizadas após montagem metalográfica dos cortes transversais A e B efetuados nas ferramentas de cravação (Figura 48).

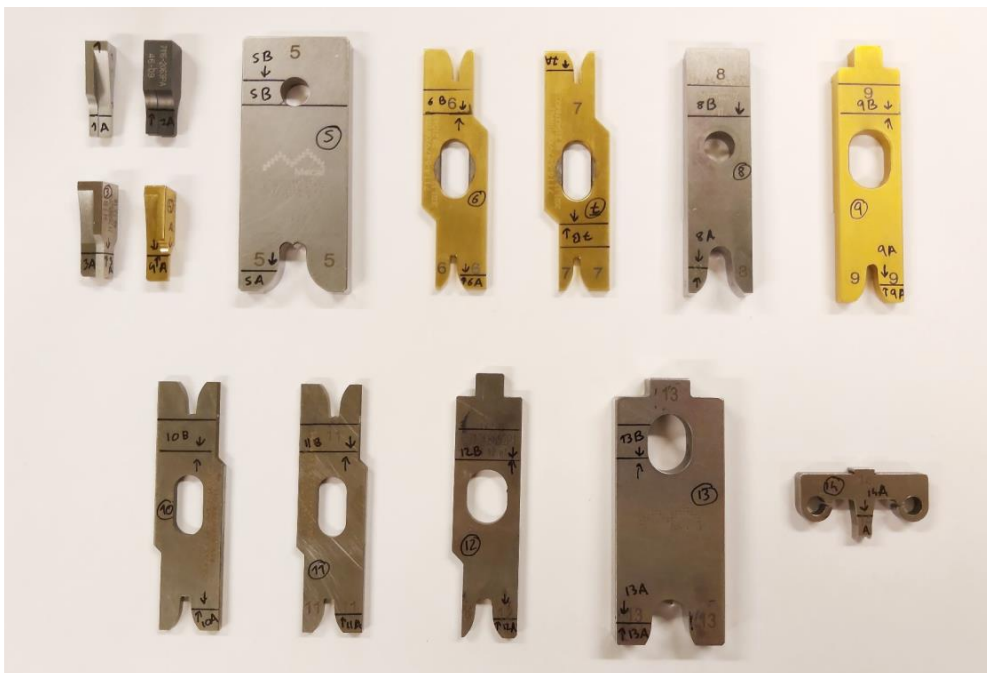


Figura 48 - Identificação dos cortes realizados nas amostras para análise: corte A – zona útil das ferramentas; corte B – zona não útil.

3.3.2 Análise de resultados

A análise de resultados dividiu-se em três diferentes fases. Primeiramente fez-se uma análise química onde se determinou que tipo de aço é utilizado em cada amostra, seguiu-se a determinação da dureza e posteriormente realizou-se uma análise metalográfica.

3.3.2.1 Análise química

Na Tabela 11 apresentam-se as composições químicas (% em massa) do material base das amostras produzidas/recolhidas obtidas por espectrometria de emissão ótica. Estes resultados foram obtidos com o espectrómetro FM EXPERT da fabricante Hitachi.

Tabela 11 - Composição química obtida para o material base das amostras analisadas

Refª da amostra	Composição química em %wt								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
1	0,61	0,36	0,84	0,02	<0,001	4,82	0,58	0,23	0,02
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,09	<0,001	0,25	0,03	0,004	<0,01	0,007	92,0	
2	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,71	0,24	2,19	0,007	<0,001	0,27	0,01	0,04	0,02
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,03	<0,005	0,09	0,01	0,004	<0,01	0,005	96,2	
3	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,47	0,39	0,42	0,02	<0,001	3,28	1,49	0,06	0,02
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,03	<0,005	0,23	0,01	0,004	<0,01	0,01	93,5	
4	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,40	1,12	0,44	0,02	<0,001	5,70	1,54	0,12	0,02
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,08	<0,005	0,80	0,01	0,004	0,01	0,005	89,7	
5	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,28	0,27	0,32	0,03	<0,001	13,6	0,08	0,19	0,001
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,09	<0,001	0,06	0,06	0,003	0,002	<0,01	84,9	

6	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,41	1,02	0,40	0,02	<0,001	5,59	1,44	0,12	0,02
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,04	<0,01	0,77	0,07	0,005	0,006	<0,01	90,0	
7	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,42	1,04	0,41	0,007	<0,001	5,72	1,46	0,12	0,02
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,04	<0,01	0,77	0,07	0,006	0,008	<0,01	89,8	
8	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,56	0,26	0,29	0,007	0,003	1,02	0,22	2,54	0,02
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	0,005	0,005	<0,01	94,9	
9	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,88	0,26	0,50	0,01	<0,001	5,43	1,24	0,15	<0,01
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,07	<0,01	0,19	0,03	0,005	0,001	<0,01	91,1	
10	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,44	0,31	0,62	0,006	<0,001	3,64	1,66	0,11	<0,01
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,06	<0,01	0,12	0,01	0,007	0,003	<0,01	92,9	
11	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,41	0,30	0,64	0,01	<0,001	3,58	1,61	0,11	<0,01

12	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,06	<0,01	0,12	<0,01	<0,007	<0,005	<0,01	93,0	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,53	0,26	0,77	<0,01	<0,001	0,77	0,02	0,04	0,03
13	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	<0,007	<0,005	<0,01	97,4	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,28	0,28	0,28	<0,01	<0,001	13,48	0,14	0,20	<0,001
14	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,05	<0,01	0,08	0,02	<0,007	<0,005	<0,01	85,1	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	1,32	0,28	0,29	<0,01	<0,001	11,9	0,95	0,15	<0,001
14	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,10	<0,01	0,64	0,03	<0,007	<0,005	<0,01	84,3	

A composição química obtida para a matéria-prima da ferramenta de cravação nº 1, do fabricante Ozturk, refere-se a um aço para ferramentas com teor considerável de cromo (4,82 %wt). Embora com menor teor de silício e molibdénio, a sua composição assemelha-se à do aço para ferramentas (Cr-Mo-Si-V) referente à norma CSN 41 9569 (Anexo 1 - Figura 96).

Relativamente ao material base da ferramenta de cravação nº 2, do fabricante Mecal, dada a sua composição química, este é um aço para ferramentas de trabalho a frio que possui um médio/alto teor de carbono (0,71 %wt) e um elevado teor de manganês (2,19 %wt). A sua composição é semelhante à estabelecida na norma CSN 41 9312 que, por sua vez, é similar ao aço ISO 90MnCrV8 (Anexo 1 - Figura 97).

A amostra 3, do fabricante Hibara, apresenta uma composição química típica de um aço AISI S7 (ISO 50CrMoV13-15) - aço para ferramentas resistente a choques (Anexo 1 - Figura 98). A sua composição química é idêntica à das ferramentas 10 e 11, fabricadas pela Ricardo & Barbosa.

As matérias-primas das ferramentas de cravação 4, 6 e 7, todas produzidas pela Ricardo & Barbosa, possuem uma composição química semelhante entre si e, tal como referenciado pela empresa, pelos respetivos resultados da espectrometria de emissão ótica, constata-se que o aço utilizado nestas ferramentas apresenta uma composição química equivalente à do aço AISI H13 (ISO X40CrMoV5-1) – aço para ferramentas de trabalho a quente com teor de crómio considerável (Anexo 1 - Figura 99).

A composição química obtida para o material-base da ferramenta de cravação nº 5, produzida pela Mecal, é coerente com a do aço AISI 420 (EN X30Cr13), que diz respeito a um aço inoxidável martensítico (composição química normalizada: anexo 1 - Figura 100). Este aço apresenta um baixo teor de carbono (0,28 %wt) e um elevado teor de crómio (13,6 %wt). A sua composição química é idêntica à da ferramenta nº 13, produzida pelo mesmo fabricante.

Ao contrário das restantes amostras, a ferramenta de cravação nº 8, produzida pela Mecal, possui na composição química do seu material-base um considerável teor de níquel (2,54 %wt). A composição química determinada por espectrometria é semelhante à dos aços DIN 50NiCr13, DIN 55NiCr10 ou UNE 55NiCr12 – aços para ferramentas de trabalho a frio (composição química normalizada: anexo 1, Figura 101).

Relativamente à amostra nº 9, produzida pela Mecal, a sua matéria-prima, que até ao momento era desconhecida, apresenta uma composição química com um elevado teor de carbono (0,88 %wt) e com um teor considerável de crómio (5,43 %wt) e de molibdénio (1,24 %wt). A sua composição é equivalente à do aço AISI A2 (ISO X100CrMoV5), que representa um aço para ferramentas de trabalho a frio de endurecimento ao ar (têmpera ao ar). A composição química normalizada do aço AISI A2 encontra-se exibida no anexo 1, na Figura 102.

Os resultados obtidos por espectrometria, referentes às amostras 10 e 11, confirmam que o material base utilizado é um aço para ferramentas resistente a choques AISI S7 (ISO 50CrMoV13-15). Tal como referido anteriormente, estas ferramentas da R&B possuem uma composição semelhante à ferramenta 3 do fabricante Hibar. A composição química normalizada deste aço encontra-se apresentada no anexo 1 - Figura 98.

Dada a composição química do material-base da ferramenta de cravação nº 12, fabricada pela Hibar, este caracteriza-se por ser um aço de baixa liga, mais concretamente da série 5100 (ligado ao crómio). A sua composição química é típica de um aço AISI 5150, nomeadamente devido ao teor médio de carbono (0,53 %wt) e aos seus teores de crómio (0,77 %wt) e manganês (0,77 %wt). A composição química normalizada do aço AISI 5150 encontra-se disponível na Figura 103, constante do anexo 1.

Tal como mencionado anteriormente, a ferramenta de cravação nº 13, produzida pela Mecal, apresenta uma composição química típica do aço AISI 420 (EN X30Cr13),

referente a um aço inoxidável martensítico (composição química normalizada: anexo 1 - Figura 100). Este aço possui um baixo teor de carbono (0,28 %wt) e um elevado teor de crómio (13,48 %wt).

Por último, a matéria-prima da ferramenta de cravação nº 14, fabricada pela Mecal, detém uma composição química com elevado teor de carbono (1,32 %wt) e de crómio (11,9 %wt), para além de teores consideráveis de molibdénio (0,95 %wt) e vanádio (0,64 %wt). A sua composição é típica de um aço AISI D2 (ISO X153CrMoV12), caracterizando-se este por ser um aço para ferramentas de trabalho a frio com alto teor de carbono e alto teor de crómio (série D). A composição química normalizada do aço AISI D2 encontra-se apresentada na Figura 104, presente no anexo 1.

Todas as correspondências entre as composições químicas e o tipo de aço que se identificou foram realizadas através de uma ferramenta do *website* Total Materia, que permite pesquisar aços pela composição química.

3.3.2.2 *Determinação da dureza*

Para a determinação das durezas do material base realizou-se o ensaio de dureza Vickers com uma carga de 1 kg, aplicada por uma pirâmide quadrangular de diamante durante 10 segundos. O equipamento utilizado foi um durómetro Vickers HM-200 do fabricante Mitutoyo. Existem certas precauções a ter em conta neste teste de dureza, as mais importantes são:

- A superfície do material deve estar polida;
- Não devem existir vibrações na mesa onde se encontra a máquina de medição;
- As peças devem estar solidamente fixas;
- A distância entre o bordo da peça e o centro de indentação deve ser superior a duas vezes a diagonal.

A Figura 49 apresenta os resultados das medições das durezas (HV1) do material base das catorze ferramentas submetidas a estudo. A análise global dos resultados permite concluir que a maioria das soluções adotadas pelos diversos fabricantes, embora distintas em termos de aços utilizados, possibilita a obtenção de durezas elevadas, sendo que se alcançaram valores superiores a 600 HV na matéria-prima de dez das ferramentas examinadas. Adicionalmente, na maioria das amostras analisadas, as durezas médias obtidas foram semelhantes, situando-se na gama de valores de 600 – 635 HV.

Os valores mais elevados de dureza foram conseguidos para o material base da ferramenta de cravação nº 14 (Mecal), caso em que se verificou uma dureza média de 664 HV. Tal como determinado no subcapítulo anterior, nesta ferramenta de cravação foi utilizado um aço AISI D2. Um resultado de dureza semelhante foi conseguido para a ferramenta nº 11 (Ricardo & Barbosa), verificando-se uma dureza média de 662 HV

(aço AISI S7). Este aço (AISI S7) possui uma elevada dureza para uma temperatura de revenido de aproximadamente 150°C (Dureza: 680 HV) e uma dureza maximizada para uma temperatura de revenido de 205°C (Dureza: 735 HV). Contrariamente, os valores mais reduzidos de dureza foram determinados para o material base da ferramenta de cravação nº 9 (Mecal), alcançando-se uma dureza média de 457 HV. Nesta ferramenta foi aplicado um aço de composição química similar à do aço AISI A2. Dependendo do tratamento térmico executado, este aço pode apresentar uma dureza na gama dos 660 – 770 HV. Um melhor equilíbrio entre dureza e resistência mecânica no material AISI A2 é conseguido para temperaturas de revenido próximas de 200°C (Dureza: 760 HV).

Medição	Amostra													
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
1ª	621	633	607	621	586	627	625	584	463	573	668	553	566	675
2ª	619	635	594	613	590	627	635	652	462	554	666	549	563	666
3ª	613	637	609	615	633	621	633	659	446	530	652	549	556	652
Média	618	635	603	616	603	625	631	632	457	552	662	550	562	664
Desvio Padrão	4,16	2,00	8,14	4,16	26,06	3,46	5,29	41,43	9,54	21,55	8,72	2,31	5,13	11,59

Figura 49 - Resultados da medição das durezas (HV1) do material base das amostras

3.3.2.3 Análise Metalográfica (Microscopia Ótica e SEM-EDS)

Na análise metalográfica realizada às amostras em estudo, utilizou-se o equipamento FEI Quanta 400FEG para a análise SEM, equipado com um espectroscópio EDAX Genesis X-ray (análise EDS) e um microscópio ótico.

A análise metalográfica executada à ferramenta de cravação nº 1, produzida pela Ozturk, comprova a presença de um revestimento de espessura muito reduzida (aproximadamente 1,0 µm). Contudo, através das fotografias obtidas por microscopia ótica e eletrónica de varrimento, Figura 50a) e Figura 50b), respetivamente, comprova-se que este revestimento se encontra fragmentado, existindo pouca aderência ao substrato após a realização do corte metalográfico das amostras. Os resultados da análise EDS (Figura 50c)) indicam que o revestimento utilizado tem como base crómio (crómio duro).

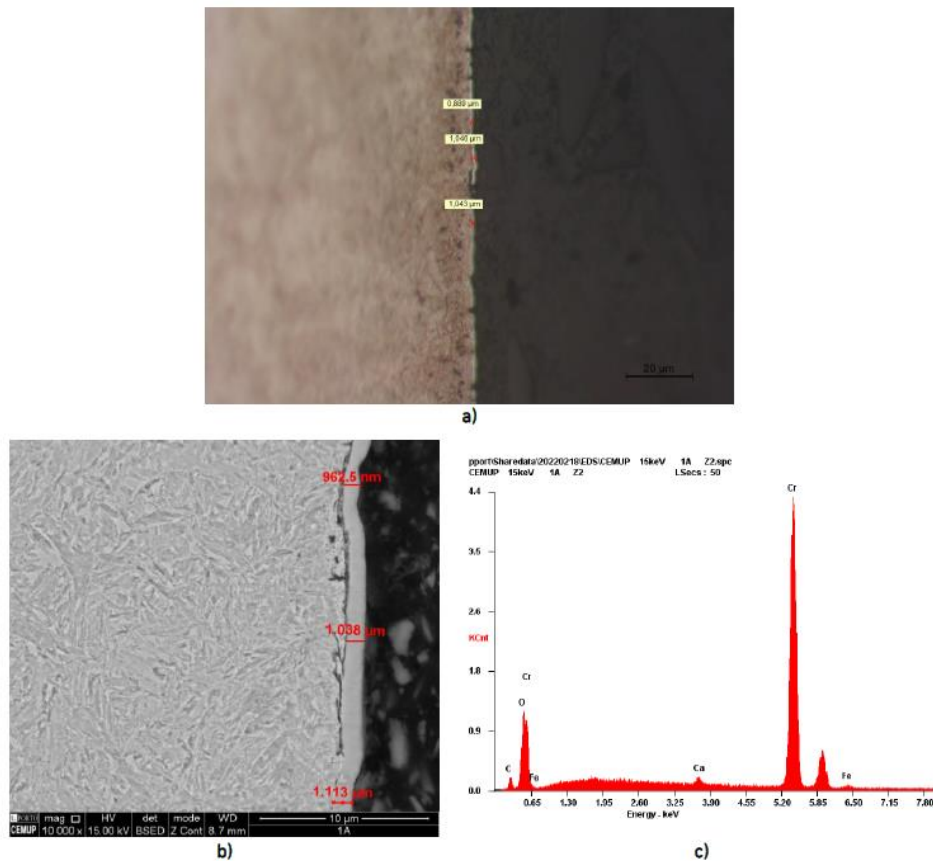


Figura 50 - Caracterização metalográfica realizada à amostra 1: a) visualização em microscópio ótico da camada de revestimento; b) análise SEM da camada de revestimento; c) espectro EDS obtido para o revestimento.

Para as ferramentas de cravação nº2 (Mecal) e nº3 (Hibara), tanto a análise por microscopia ótica como por microscopia eletrônica de varrimento (SEM) não revelaram a presença de revestimentos após corte metalográfico (Figura 51 – amostra 2 e Figura 52 – amostra 3). A não existência de depósitos localizados de revestimento na superfície destas amostras, após corte metalográfico, leva a crer que estas ferramentas nunca possuíram revestimento, não configurando uma situação em que o revestimento possa ter sido removido aquando da preparação das amostras.

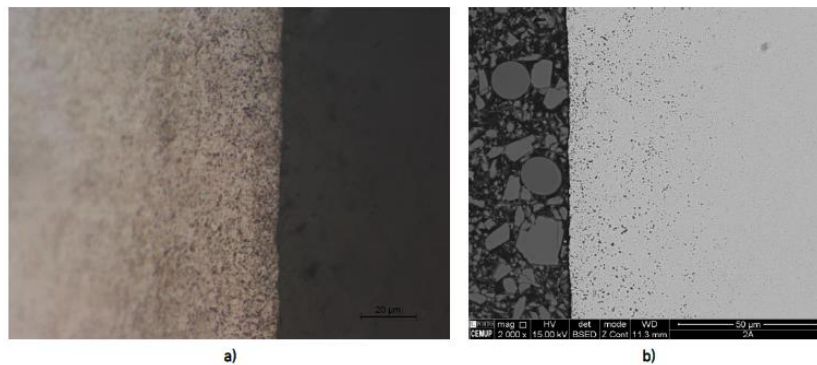


Figura 51 - Caracterização metalográfica realizada à amostra 2: a) visualização em microscópio ótico; b) análise SEM.

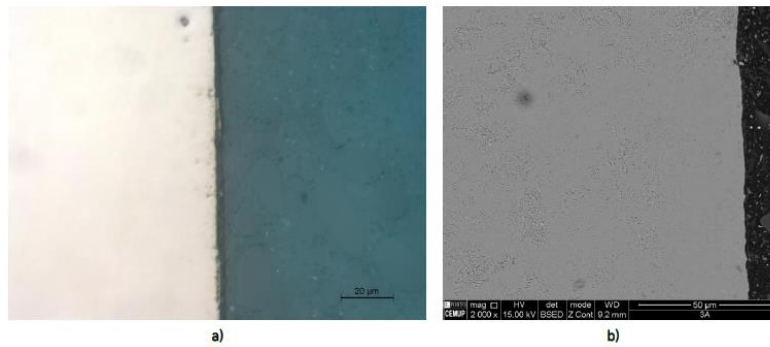


Figura 52 - Caracterização metalográfica realizada à amostra 3: a) visualização em microscópio ótico; b) análise SEM.

A ferramenta de cravação nº 4, fabricada pela Ricardo & Barbosa, apresenta um revestimento uniforme e contínuo ao longo da amostra, com uma espessura média de 2,5 – 2,6 µm (Figura 53a) e Figura 53b)). Através da observação das fotografias obtidas por microscopia ótica e eletrônica de varrimento (SEM), é possível constatar que, mesmo após a execução do corte metalográfico da amostra, o revestimento apresenta uma aderência muito boa ao substrato, não existindo qualquer separação/vazio entre estes elementos. Os resultados da análise EDS (Figura 53c)) comprovam que o material utilizado no revestimento é nitreto de titânio (TiN) – Balinit A, depositado por PVD.

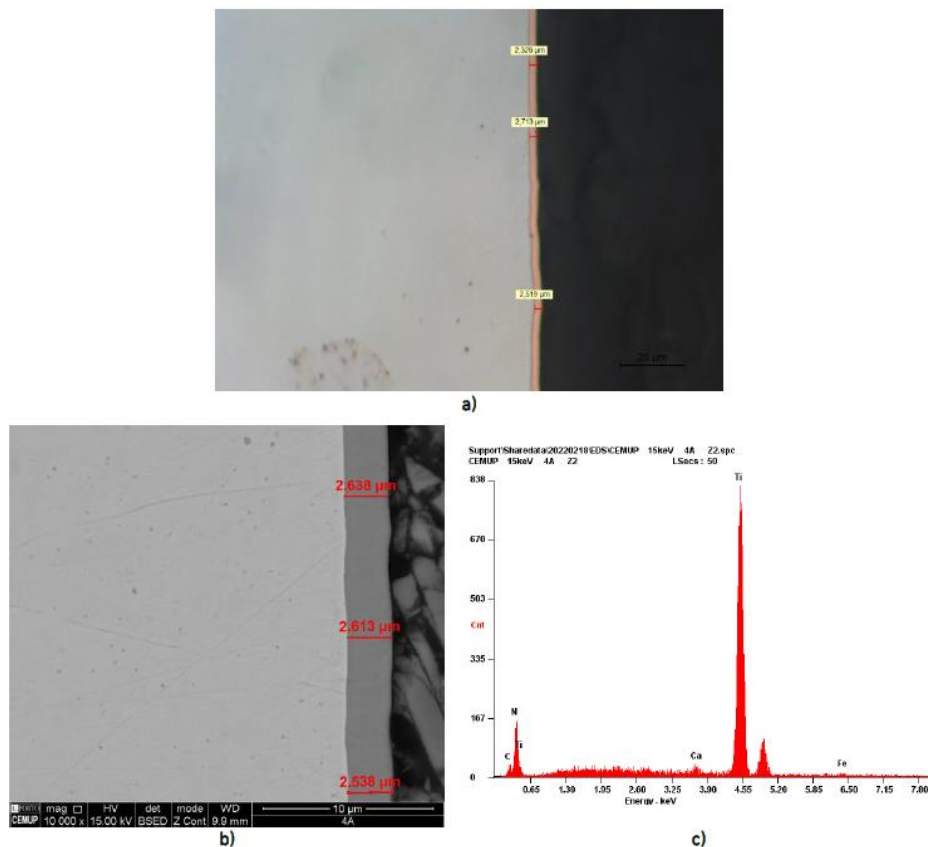


Figura 53 - Caracterização metalográfica realizada à amostra 4: a) visualização em microscópio ótico da camada de revestimento; b) análise SEM da camada de revestimento; c) espectro EDS obtido para o revestimento.

No que diz respeito à ferramenta de cravação nº5 (Mecal), a análise metalográfica efetuada (Figura 54) não revelou a presença de revestimento superficial, tanto na zona funcional da ferramenta como na zona não útil. Dado o estado superficial uniforme da amostra, pode concluir-se que esta, originalmente, não possuía revestimento, não configurando, deste modo, uma situação em que o revestimento possa ter sido removido aquando do corte metalográfico das amostras. O facto de o aço AISI 420, matéria-prima desta ferramenta, possuir na sua composição química um elevado teor de crómio (13,6 %wt), pode justificar a opção de não realizar um revestimento superficial de crómio duro.

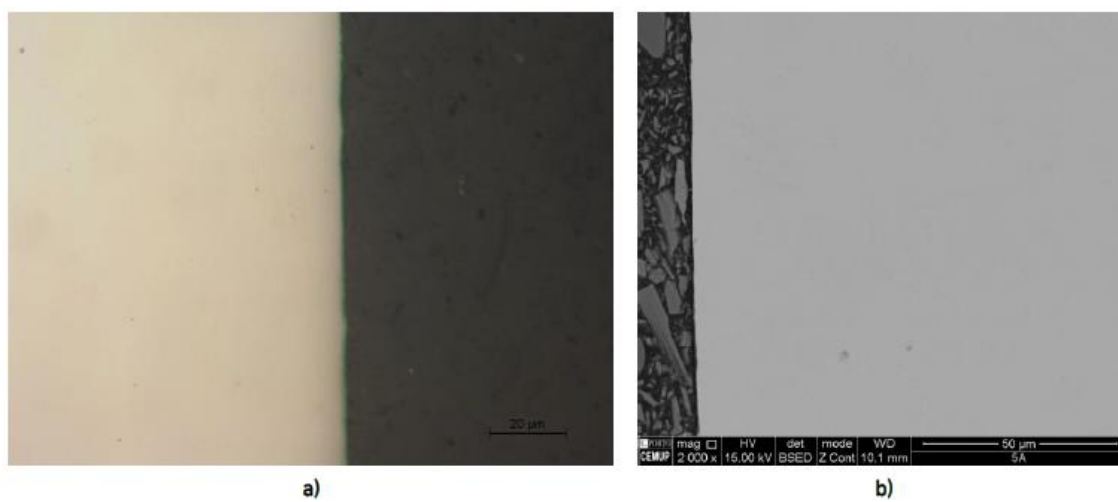


Figura 54 - Caracterização metalográfica realizada à amostra 5: a) visualização da superfície em microscópio ótico; b) análise SEM da zona funcional.

As ferramentas de cravação 6 e 7, ambas produzidas pela R&B e idênticas entre si, apresentam um revestimento contínuo ao longo das respetivas amostras. Através da análise realizada por microscopia ótica (Figura 55), é possível visualizar que esta camada de revestimento, embora contínua, não é uniforme nas diferentes zonas das ferramentas sujeitas a inspeção. Deste modo, a camada de revestimento da ferramenta nº 6 possui uma espessura média de 1,67 µm na sua zona funcional e de 1,34 µm na zona não útil. Por sua vez, o revestimento presente na ferramenta nº 7 detém uma espessura média de 2,27 µm na zona funcional e de 1,69 µm na zona não útil. Adicionalmente, nas amostras referentes à ferramenta de cravação nº 7, visualizaram-se, após a execução dos cortes metalográficos, algumas zonas de fragmentação e separação do revestimento relativamente ao substrato, o que poderá indicar falta de adesão entre estes elementos. A análise SEM-EDS executada à zona funcional da ferramenta de cravação nº6 (Figura 56) comprova que o material utilizado na camada de revestimento é nitreto de titânio (N: 12,44 %wt; Ti: 83,72 %wt) - Balinit A, depositado por PVD.

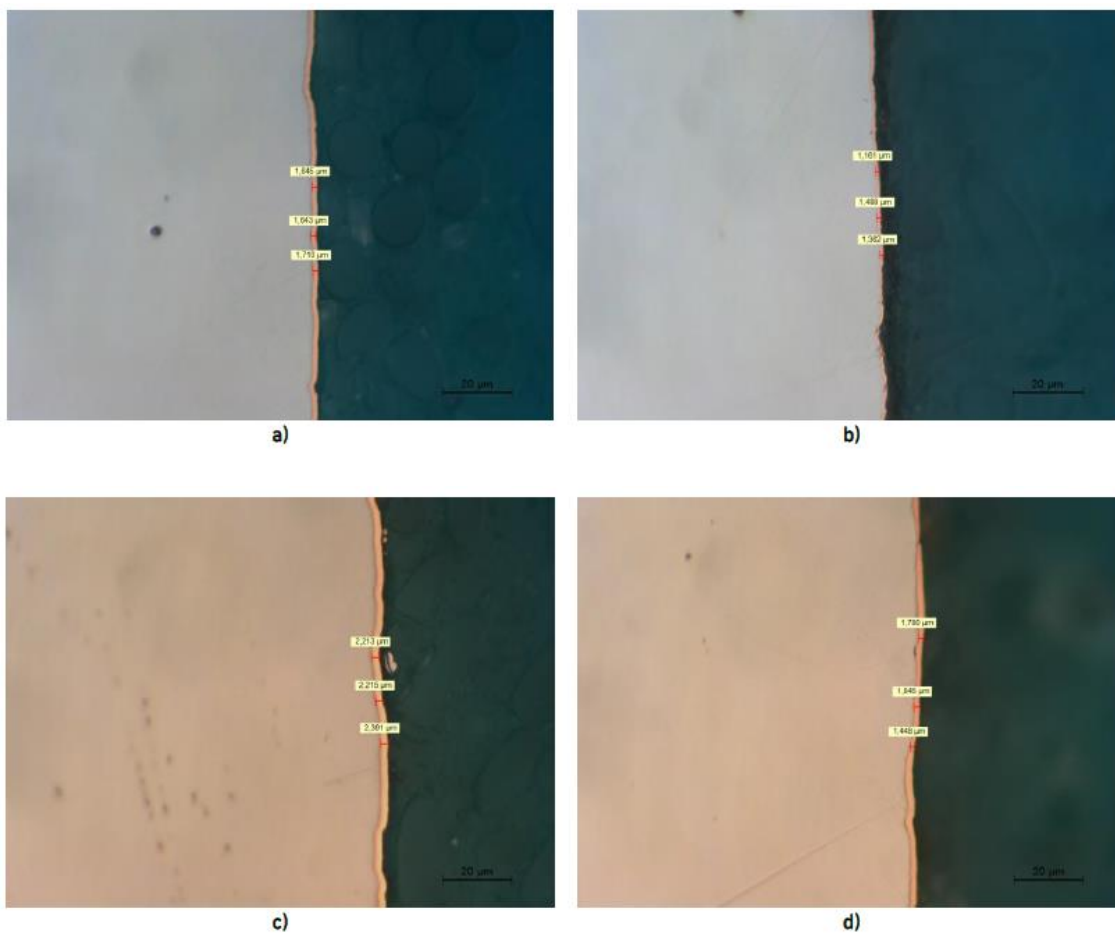


Figura 55 - Visualização em microscópio ótico da camada de revestimento das ferramentas de cravação 6 e 7: a) amostra 6 – zona funcional; b) amostra 6 – zona não útil; c) amostra 7 – zona funcional; d) amostra 7 – zona não útil.

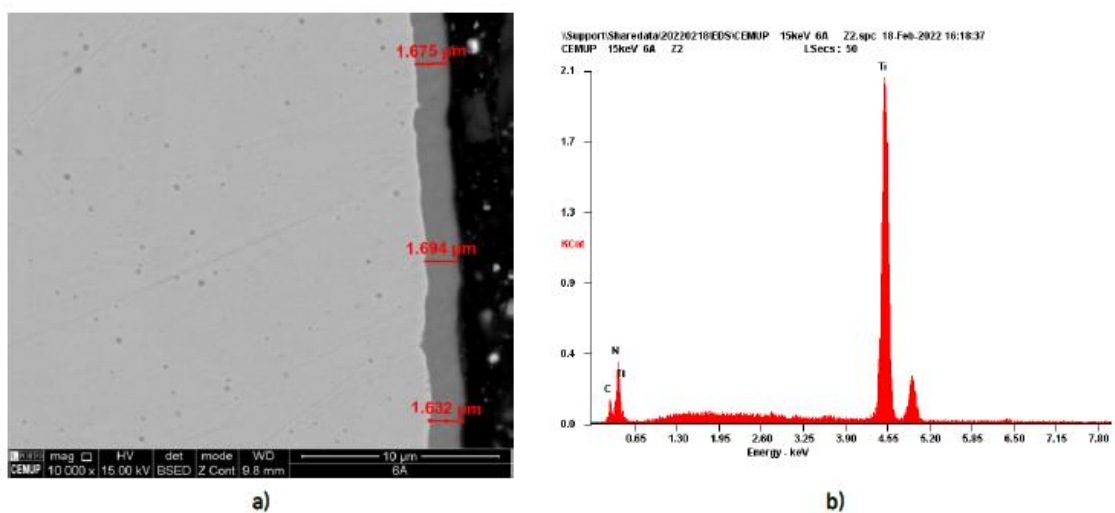


Figura 56 - Análise SEM-EDS executada à amostra 6 (zona funcional): a) visualização SEM da camada de revestimento e respetiva espessura; b) espectro EDS obtido para o revestimento.

As análises por microscopia ótica e por microscopia eletrónica de varrimento (SEM) à ferramenta de cravação nº 8 (Mecal) não revelaram a presença de revestimento superficial, tanto na zona funcional da ferramenta como na zona não útil (Figura 57). Dada a inexistência de depósitos localizados de revestimento na superfície das amostras, após corte metalográfico, conclui-se que a ferramenta não possuía de origem qualquer tipo de revestimento superficial, excluindo-se a hipótese de este ter sido removido aquando da preparação das amostras.

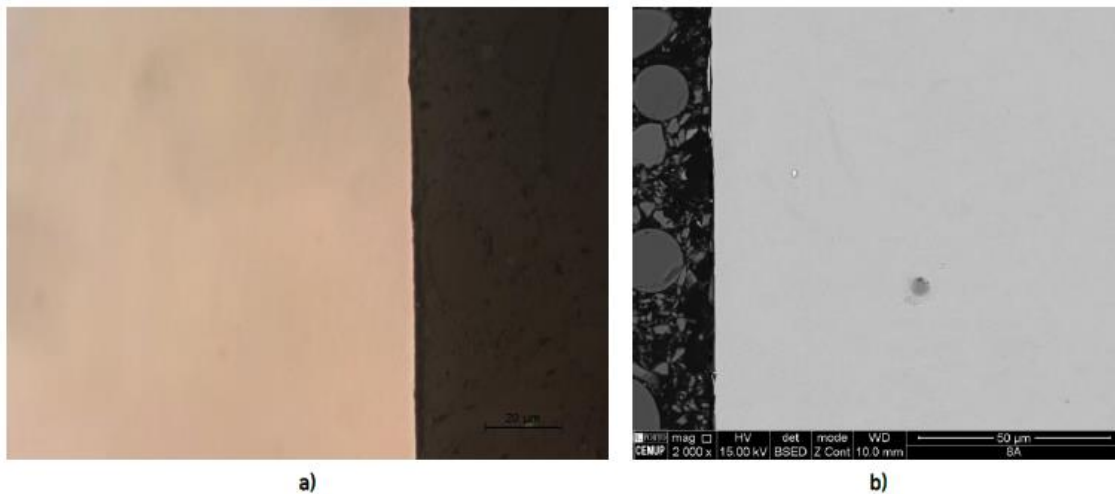


Figura 57 - Caracterização metalográfica efetuada à ferramenta de cravação nº 8: a) visualização em microscópio ótico; b) análise SEM da zona funcional.

A ferramenta de cravação nº 9, fabricada pela Mecal, possui uma camada de revestimento contínua embora pouco uniforme, demonstrando alguma irregularidade na sua espessura. Nas fotografias obtidas em microscópio ótico (Figura 58), é possível determinar uma espessura média da camada de revestimento de 3,17 µm na zona funcional da ferramenta e de 1,63 µm na zona não útil.

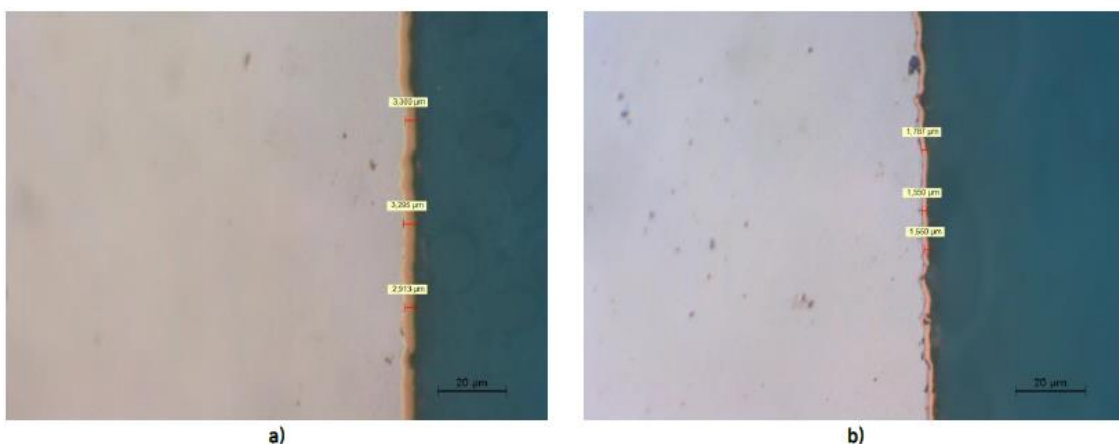


Figura 58 - Visualização em microscópio ótico da camada de revestimento da ferramenta de cravação nº 9: a) zona funcional; b) zona não funcional.

Contudo, mesmo na própria zona funcional da ferramenta, existe uma variação considerável da espessura do revestimento, tal como pode ser comprovado pela visualização dos resultados da análise SEM (Figura 59a) e Figura 59b)). Assim sendo, em duas zonas distintas da parte funcional da ferramenta, observam-se espessuras de revestimento que variam de 2,26 μm até 4,02 μm . Adicionalmente, na zona não funcional da ferramenta, observa-se alguma separação do revestimento ao substrato após o corte metalográfico da amostra, o que poderá indiciar falta de adesão entre estes elementos. Os resultados da análise EDS (Figura 59c)) demonstram que o material utilizado na camada de revestimento é nitreto de titânio (N: 12,66 %wt; Ti: 84,31 %wt) - Balinit A, depositado por PVD.

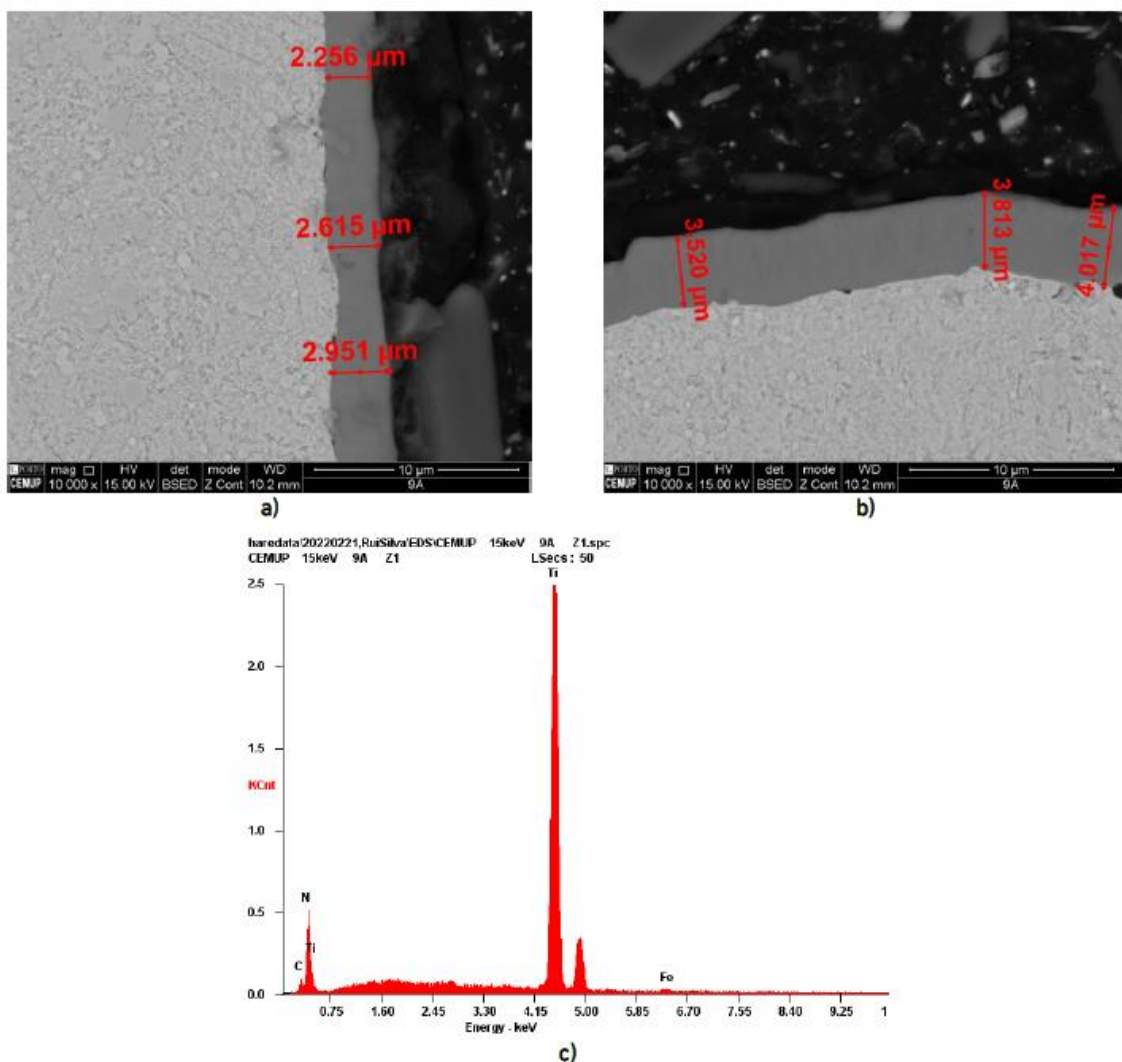


Figura 59 - Análise SEM-EDS executada à amostra 9 (zona funcional): a) visualização da espessura da camada de revestimento – zona 1; b) determinação da espessura da camada de revestimento – zona 2; c) espectro EDS obtido para o revestimento.

As ferramentas de cravação nº 10 e 11, ambas produzidas pela R&B e similares entre si, não possuem qualquer tipo de revestimento superficial, tal como pode ser observado na Figura 60. Nesta figura, encontram-se exibidos os resultados da análise por microscopia ótica e por microscopia eletrônica de varrimento (SEM), obtidos para a zona funcional da ferramenta de cravação nº 10. Resultados idênticos foram visualizados na zona não útil da mesma ferramenta e nos cortes transversais executados à ferramenta nº 11 (zonal funcional e zona não útil). Estas ferramentas foram submetidas a um tratamento de *shot peening*, que consiste na projeção de microesferas sobre a sua superfície, resultando na geração de tensões de compressão que impedem a formação/propagação de fissuras superficiais e, conseqüentemente, contribuem para o aumento da resistência à fadiga dos componentes.

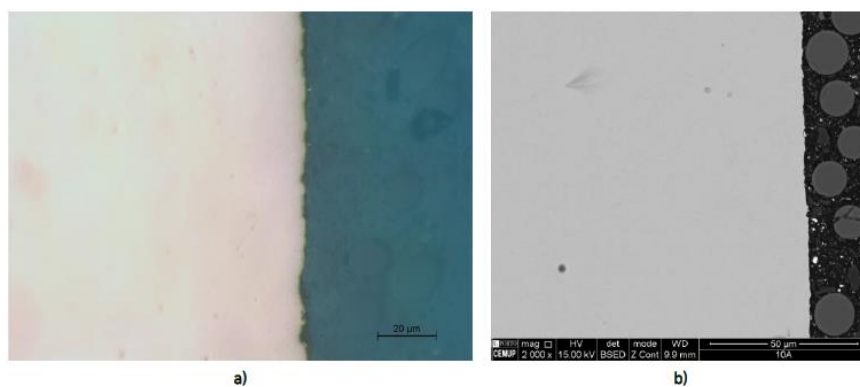


Figura 60 - Caracterização metalográfica efetuada à ferramenta de cravação nº 10: a) visualização da superfície em microscópio ótico; b) análise SEM da zona funcional.

Similarmente ao visualizado nas amostras 10 e 11, os resultados das análises por microscopia ótica e por microscopia eletrônica de varrimento (SEM), realizadas à ferramenta de cravação nº 12 (Hibara), não demonstraram a existência de revestimento superficial, tanto na zona funcional da ferramenta como na zona não útil, pelo que se conclui que estas amostras são idênticas. A superfície da zona funcional desta ferramenta pode ser observada na Figura 61.

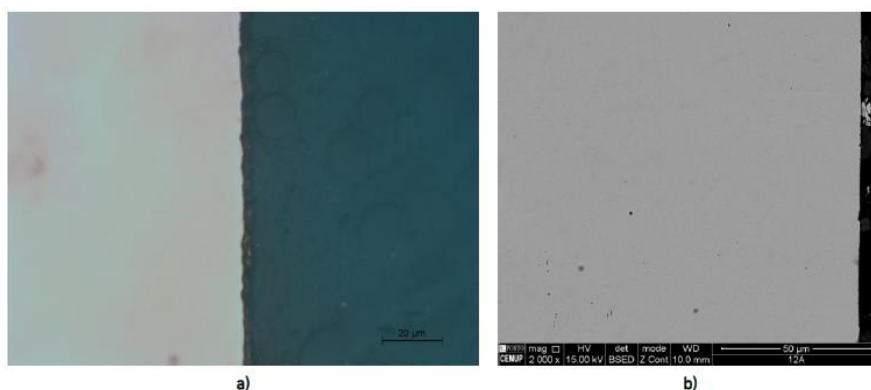


Figura 61 - Caracterização metalográfica efetuada à ferramenta de cravação nº 12: a) visualização da superfície em microscópio ótico; b) análise SEM da zona funcional.

A análise metalográfica realizada (Figura 62) à ferramenta de cravação nº 13 (Mecal) não revelou a presença de revestimento superficial, tanto na zona funcional da ferramenta como na zona não útil. Contudo, a análise SEM efetuada à amostra relativa à zona funcional da ferramenta revelou a presença de uma região de desgaste superficial (Figura 62c)), levando a crer que a ferramenta já tenha realizado ciclos de operação.

O espectro EDS obtido para esta região de desgaste (Figura 62d)) indica a presença de cobre e zinco, para além dos elementos químicos naturais do aço, que deverão ser provenientes das cravações executadas em terminais de latão. Uma hipótese alternativa para a existência desta região de desgaste é que esta pode resultar do processo de eletroerosão de fio sem uma posterior operação de remoção da camada branca, dada a presença de cobre e zinco na sua composição (material utilizado no eléctrodo com formato de fio).

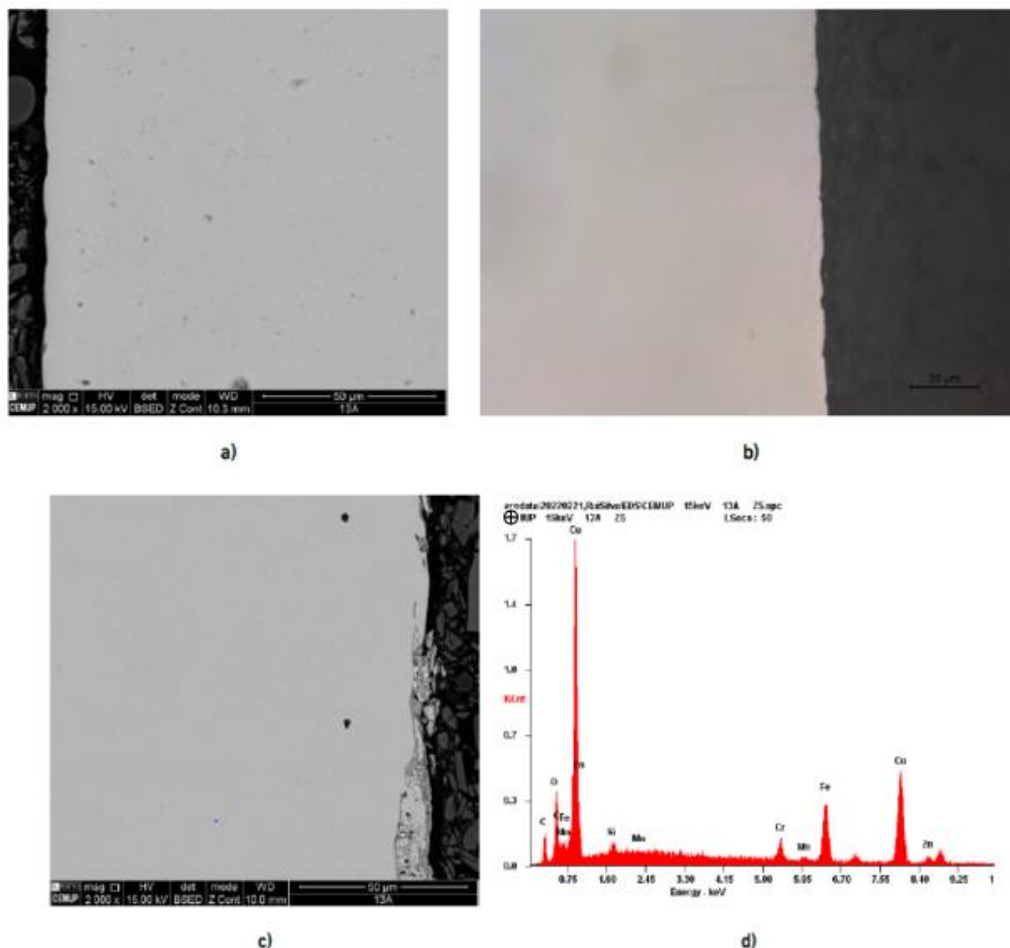


Figura 62 - Caracterização metalográfica executada à ferramenta de cravação nº 13: a) análise SEM da superfície da amostra (zona funcional); b) visualização em microscópio ótico; c) análise SEM da superfície da amostra (zona funcional) desgastada; d) espectro EDS

Os resultados da análise metalográfica executada à ferramenta de cravação nº 14 (Mecal) são semelhantes aos obtidos para a ferramenta anterior, visualizando-se uma região de desgaste superficial com a presença de cobre e zinco, para além dos elementos químicos intrínsecos ao aço, indiciando que a ferramenta já tenha sido utilizada na realização de cravações (Figura 63). Tal como sugerido anteriormente, uma outra hipótese para o aparecimento desta região de desgaste é que esta possa ter resultado do processo de eletroerosão de fio. Esta última hipótese torna-se mais viável dado o aspeto acastanhado visível na superfície lateral da ferramenta.

Adicionalmente, não se vislumbra a utilização de revestimento superficial na ferramenta de cravação. Tal como referido na análise à ferramenta nº 5, o facto de os aços empregues nas ferramentas 13 e 14 possuírem elevado teor de crómio na sua composição química (13,5 %wt e 11,9 %wt, respetivamente) pode justificar a não utilização de um revestimento superficial de crómio duro.

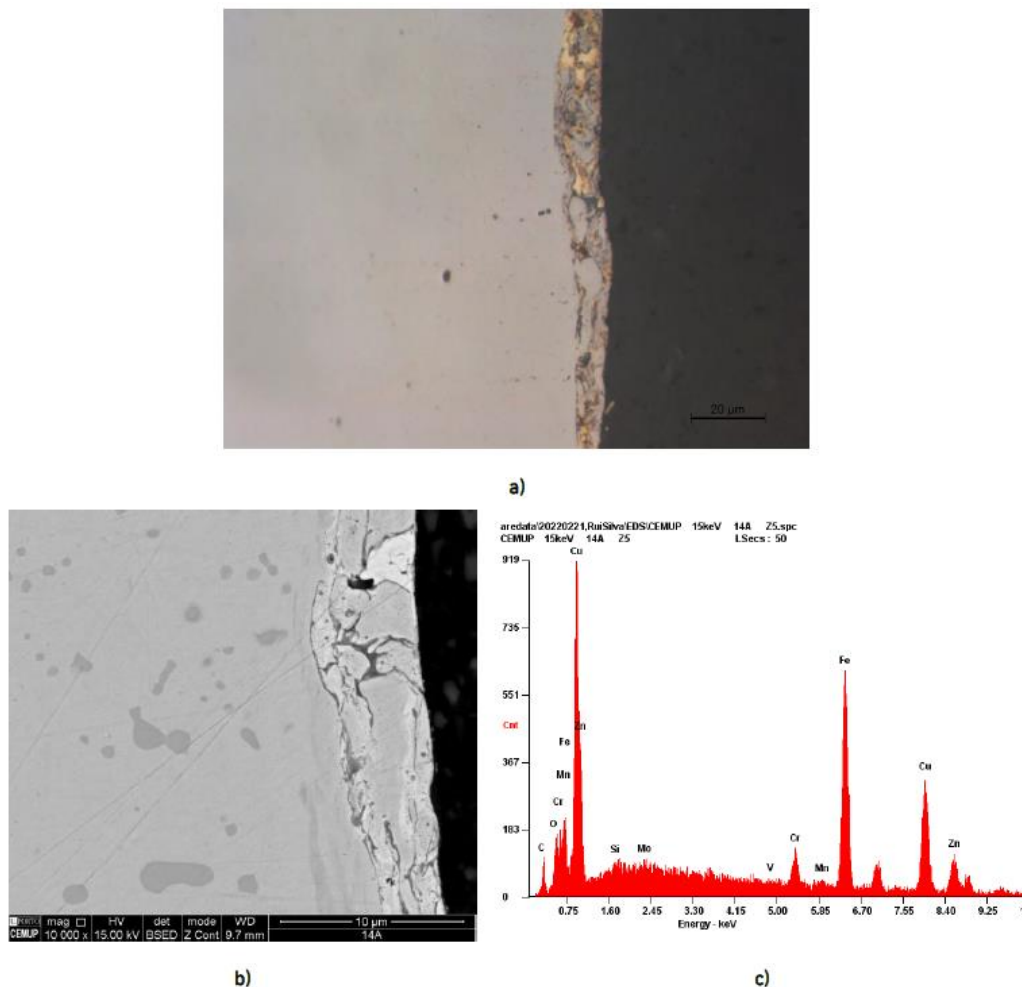


Figura 63 - Caracterização metalográfica realizada à ferramenta de cravação nº 14: a) visualização da superfície da amostra por microscopia ótica; b) análise SEM da superfície da amostra (zona funcional); c) espectro EDS obtido na superfície desgastada da amostra

3.3.3 Conclusões - Análise de benchmarking de ferramentas de cravação

A Tabela 12 sumariza os resultados da caracterização efetuada às ferramentas de cravação submetidas a análise, permitindo, deste modo, uma comparação expedita das soluções adotadas em cada uma delas.

Tabela 12 - Quadro-resumo das características das ferramentas de cravação submetidas a análise.

Amostra nº	Fabricante	Referência	Material determinado	Dureza média do material base [HV]	Tratamento superficial
1	Ozturk	7116-5678-XA	CSN 41 9569	618	Rev. crómio duro ($\approx 1,0 \mu\text{m}$)
2	Mecal	7116-2063PA	CSN 41 9312	635	Sem revestimento
3	Hibara	71268852PA	AISI S7	603	Sem revestimento
4	R&B	7116-6633XA	AISI H13	616	Rev. TiN ($\approx 2,5 \mu\text{m}$)
5	Mecal	7006-6605 CWM	AISI 420	603	Sem revestimento
6	R&B	7114-6479XW	AISI H13	625	Rev. TiN ($\approx 1,67 \mu\text{m}$)*
7	R&B	7114-6479XW	AISI H13	631	Rev. TiN ($\approx 2,27 \mu\text{m}$)*
8	Mecal	10228387	UNE 55NiCr12	632	Sem revestimento
9	Mecal	L77M3124714	AISI A2	457	Rev. TiN ($\approx 3,17 \mu\text{m}$)*
10	R&B	7116-4027DD XW	AISI S7	552	Shot peening
11	R&B	7116-4027DD XW	AISI S7	662	Shot peening
12	Hibara	71268852P1	AISI 5150	550	Sem revestimento
13	Mecal	7009-6605 CIM	AISI 420	562	Sem revestimento**
14	Mecal	10228536	AISI A2	664	Sem revestimento**

* Espessura da camada de revestimento na zona funcional da ferramenta.

** Ferramentas com presença de desgaste superficial na zona funcional.

Através dos resultados alcançados, nomeadamente em termos da dureza da matéria-prima utilizada, constata-se que diferentes soluções possibilitam a obtenção de durezas semelhantes, não sendo possível determinar uma solução ótima tendo por base somente este critério. Adicionalmente, o valor de dureza alcançado no aço depende, em grande parte, do tratamento térmico aplicado, nomeadamente das temperaturas de revenido utilizadas. Deste modo, a escolha de um determinado aço para esta aplicação implica um compromisso entre outras propriedades para além da dureza, como por exemplo tenacidade, resistência ao desgaste e estabilidade no tratamento térmico.

A Figura 64 apresenta a comparação qualitativa destas propriedades (tenacidade, resistência ao desgaste e estabilidade no tratamento térmico) para alguns dos aços com durezas semelhantes aplicados nas ferramentas de cravação, nomeadamente os aços AISI A2, S7 e D2.

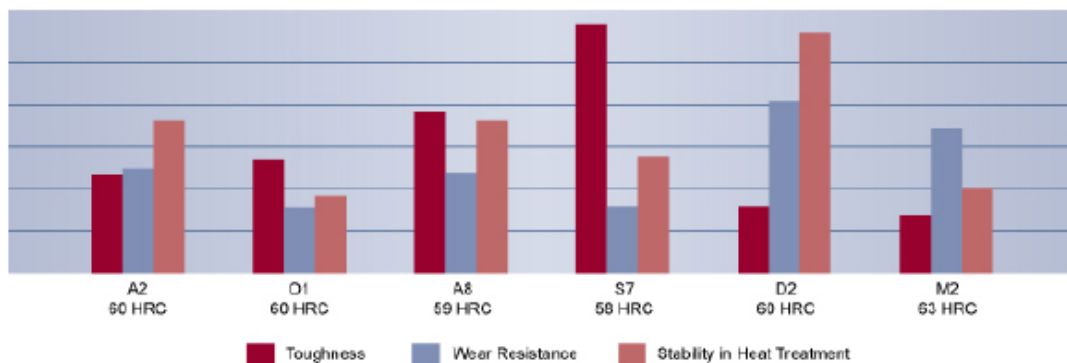


Figura 64 - Comparação das propriedades de diferentes aços para ferramentas (Hudson, 2022)

Relativamente às soluções de revestimentos superficiais examinadas, apenas na ferramenta nº 1 (Ozturk) foi identificado um revestimento de cromo duro. Contudo, este apresentava uma espessura bastante reduzida (aproximadamente 1,0 μm), encontrando-se fragmentado após corte metalográfico da amostra, evidenciando-se falta de aderência ao substrato.

A utilização de um revestimento de nitreto de titânio - Balinit A (revestimentos duros de PVD), por parte da Ricardo & Barbosa, poderá constituir uma solução interessante no sentido de aumentar a dureza superficial e diminuir o desgaste das ferramentas, permitindo aumentar o número de ciclos de vida destas. Na generalidade, os resultados da caracterização metalográfica demonstraram uma boa adesão deste revestimento ao substrato, mais concretamente nas ferramentas de cravação nº 4, 6, 7 e 9. Contudo, em algumas destas ferramentas, foi observada uma disparidade na espessura da camada de revestimento em diferentes zonas, pelo que existe a necessidade de uma otimização e uniformização desta espessura.

3.4 Caracterização de ferramentas de cravação em diferentes etapas do processo produtivo

3.4.1 Procedimento experimental

Como mencionado anteriormente, a erosão de fio leva a uma oxidação da zona superficial onde esta ocorre. Esta zona chama-se camada branca, um ponto de fragilidade na zona funcional do punção, pelo que a eficiente remoção da mesma constitui um ponto muito importante para o objetivo final do trabalho prático. Após uma primeira análise de amostras com materiais e tratamentos superficiais alternativos, pretendeu-se estudar o impacto da camada branca na zona funcional das ferramentas de gravação e a qualidade do processo atualmente utilizado. De modo a verificar a importância e a qualidade atual do processo atualmente utilizado para remover a camada branca, decidiu-se analisar amostras em diferentes etapas do processo produtivo. Testaram-se amostras saídas diretamente da operação de erosão de fio e ainda amostras sujeitas ao tratamento de jato de areia. Nenhuma das amostras foi sujeita a qualquer revestimento superficial. A Tabela 13 apresenta as ferramentas submetidas a análise.

Tabela 13 - Identificação das amostras submetidas a análise (ferramentas 15 a 22).

Amostra Nº	Fabricante	Processo produtivo	Referência	Material
15	R&B	Jato de areia	BAW2292100420.N	AISI H13
16	R&B	Erosão	BAW2292100420.N	AISI H13
17	R&B	Jato de areia	DWB229063025.N	AISI S7
18	R&B	Jato de areia	FIB330062925.N	AISI S7
19	R&B	Erosão	FIB330062925.N	AISI S7
20	R&B	Jato de areia	DWB229063025.N	AISI S7
21	R&B	Jato de areia	CAI3302050250.N	AISI H13
22	R&B	Erosão	CAI3302050250.N	AISI H13

Similarmente ao realizado no primeiro estudo de caracterização intrínseco ao projeto de investigação, na presente análise foram extraídas duas amostras de cada ferramenta, uma correspondente à sua zona funcional (corte A) e outra referente à

zona não útil (corte B). Os cortes executados podem ser visualizados na Figura 65. Em seguida, as ferramentas de cravação e respectivas amostras foram submetidas a diversos ensaios de caracterização, nomeadamente:

- Espectrometria de emissão ótica (análise da composição química);
- Microscopia eletrônica de varrimento de alta resolução com microanálise por raios-X (análise SEM/EDS);
- Medição da rugosidade superficial;
- Ensaio de dureza.

A determinação da composição química do material base das ferramentas, em espectrometria de emissão ótica, foi executada após lixagem da sua superfície e os resultados foram obtidos com o espectrómetro FM EXPERT da fabricante Hitachi. A análise SEM-EDS foi concretizada em duas etapas distintas: a primeira sem montagem metalográfica em resina das zonas funcionais das ferramentas, para visualização da superfície de cravação e existência de possíveis resíduos provenientes do processo de eletroerosão, e a segunda com montagem metalográfica dos cortes transversais A e B, com o intuito de verificar a uniformidade das superfícies das ferramentas de cravação. O equipamento utilizado nesta análise foi o mesmo da análise SEM-EDS do subcapítulo anterior, FEI Quanta 400FEG (análise SEM), equipado com um espectroscópio EDAX Genesis X-ray (análise EDS). Para a determinação das durezas do material base realizou-se o ensaio de dureza Vickers com uma carga de 1 kg, aplicada por uma pirâmide quadrangular de diamante durante 10 segundos. O equipamento utilizado foi um durómetro Vickers HM-200 do fabricante Mitutoyo. A determinação da rugosidade superficial das amostras foi realizada recorrendo a um rugosímetro portátil, numa zona contígua à zona funcional das ferramentas, na superfície de corte (lateral). Este equipamento permite a medição da rugosidade superficial das amostras num curso de 4 mm, com uma velocidade de medição de 0,5 mm/s.



Figura 65 - Identificação dos cortes realizados nas amostras submetidas a análise (ferramentas 15 a 22): corte A – zona funcional; corte B – zona não útil.

3.4.2 Análise de resultados

3.4.2.1 Análise química

Na Tabela 14 apresentam-se as composições químicas (% em massa) obtidas por espectrometria de emissão ótica.

Tabela 14 - Composições químicas obtidas para os materiais base das amostras recolhidas

Refª da amostra	Composição Química em %wt								
15	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,37	1,08	0,38	0,01	<0,001	5,62	1,59	0,11	0,02
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,06	0,003	0,76	0,03	0,006	<0,005	<0,005	89,8	
16	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,37	1,05	0,39	0,02	<0,001	5,58	1,63	0,12	0,02
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,06	0,002	0,76	0,03	0,006	<0,005	<0,01	89,9	
17	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,41	0,27	0,70	0,03	<0,002	3,7	1,62	0,12	<0,01
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,06	0,002	0,76	0,03	0,006	<0,005	<0,01	89,9	
18	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
	0,41	0,28	0,65	0,02	<0,001	3,67	1,61	0,12	0,01
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,05	0,002	0,12	0,03	0,006	0,004	0,01	92,9	
19	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al

	0,43	0,28	0,68	0,03	0,002	3,61	1,56	0,12	0,01
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,06	0,001	0,12	0,03	0,005	0,005	0,02	93,0	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
20	0,41	0,27	0,69	0,03	0,002	3,67	1,61	0,12	0,009
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,05	0,001	0,12	0,03	0,005	0,005	0,02	92,9	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
21	0,40	0,77	0,34	0,008	<0,001	5,77	1,50	0,10	0,02
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,03	0,002	0,75	0,10	0,007	0,003	<0,002	90,1	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
22	0,39	0,73	0,35	0,02	<0,001	5,59	1,48	0,12	0,02
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,03	0,002	0,75	0,09	0,005	0,003	0,01	90,3	

A composição química obtida para a matéria-prima da ferramenta de cravação nº 15 confirma que o aço utilizado é o AISI H13 (1.2344 / ISO X40CrMoV5-1) – aço para ferramentas de trabalho a quente com teor de cromo considerável (composição normalizada: Anexo 1 - Figura 99). Esta composição é idêntica às determinadas para as ferramentas nº 16, 21 e 22.

Dada a composição química verificada nos ensaios de espectrometria de emissão ótica da ferramenta de cravação nº 17, verifica-se que a matéria-prima desta ferramenta é um aço AISI S7 (1.2355 / ISO 50CrMoV13-15) – aço para ferramentas resistente ao choque. O único elemento de liga que se apresenta fora da composição química normalizada para o aço AISI S7 (Anexo 1 - Figura 98) é o vanádio, cujo teor é elevado (0,76 %wt) relativamente ao intervalo especificado na norma (< 0,35 %wt).

As composições químicas alcançadas para as ferramentas de cravação nº 18, 19 e 20, idênticas entre si, são típicas de um aço AISI S7 (1.2355 / ISO 50CrMoV13-15) – aço

para ferramentas resistente a choques. Contrariamente ao sucedido para a ferramenta de cravação nº 17, todos os elementos de liga referentes ao material base destas ferramentas encontram-se dentro dos intervalos determinados na composição normalizada do aço (Anexo 1 - Figura 98).

Tal como na análise do subcapítulo anterior, todas as correspondências entre as composições químicas e o tipo de aço identificado foram realizadas através de uma ferramenta do *website* Total Materia, que permite pesquisar aços pela composição química.

3.4.2.2 Análise SEM-EDS

Entre a Figura 66 e a Figura 73 exibem-se os resultados alcançados na análise SEM-EDS realizada à superfície lateral maquinada por eletroerosão das ferramentas 15 a 22, respetivamente, na sua zona funcional de cravação. Esta caracterização foi realizada com montagem metalográfica das amostras em resina.

Relativamente às ferramentas nº 15 e 16, semelhantes entre si, embora a primeira com projeção de jato de areia para remoção da camada branca e a segunda saída diretamente de eletroerosão de fio, os resultados da análise SEM evidenciam a diferença de acabamento superficial entre as duas amostras. Deste modo, na amostra nº 15, que sofreu projeção de jato de areia (microesferas de vidro), a superfície lateral da amostra apresenta maior uniformidade (Figura 66), enquanto na amostra 16, saída de eletroerosão, a superfície lateral da amostra possui uma camada de material fundido pouco uniforme, gerada pela descarga elétrica da eletroerosão de fio (Figura 67). Na zona funcional da amostra nº 15, a projeção de jato de areia aparenta remover de forma eficaz a camada branca gerada pelo processo de eletroerosão.

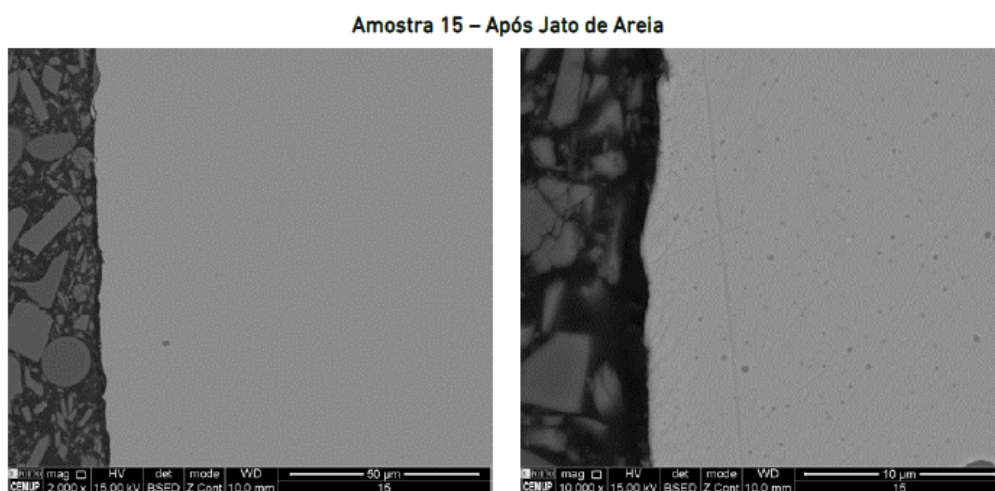


Figura 66 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 15 (zona funcional)

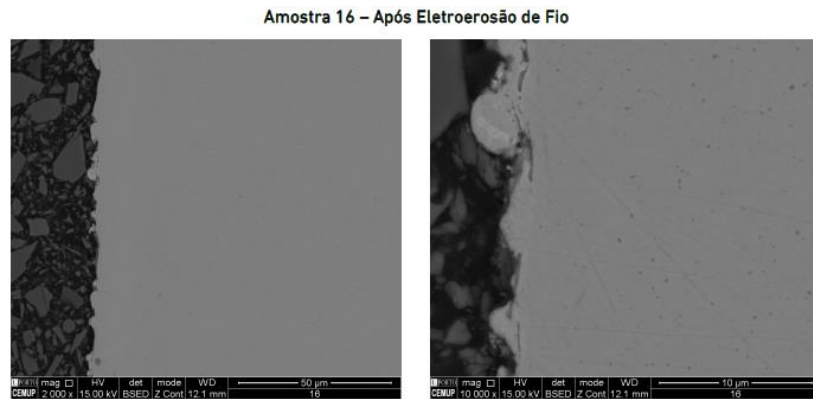


Figura 67 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 16 (zona funcional)

No que diz respeito às ferramentas nº 17 e 20, idênticas entre si, e nº 18 e 19, também semelhantes entre si, apenas a ferramenta nº 19 corresponde a uma amostra saída diretamente de eletroerosão de fio, sendo que as restantes sofreram projeção de jato de areia (microesferas de vidro). Assim sendo, na amostra nº 19, a superfície lateral, gerada por eletroerosão, possui uma camada de material fundido originada pela descarga elétrica intrínseca ao processo (Figura 70), sendo também menos uniforme que a superfície lateral das restantes amostras. Contudo, na superfície lateral das amostras provenientes de jato de areia (17, 18 e 20), ainda aparenta haver alguns resíduos gerados pelo processo de eletroerosão, podendo não haver uma remoção efetiva da camada branca (*die form* acastanhado na zona funcional). Embora estas amostras exibam uma superfície lateral mais uniforme quando comparadas com a amostra nº 19, saída de eletroerosão, a diferença de acabamento superficial é menos notória do que a verificada entre as amostras nº 15 e 16. Nestas amostras, os “pontos” brancos observáveis na matéria-prima correspondem a partículas de molibdénio (provavelmente carbonetos de molibdénio - MoC), o que significa que este elemento químico não está homogêneo no aço.

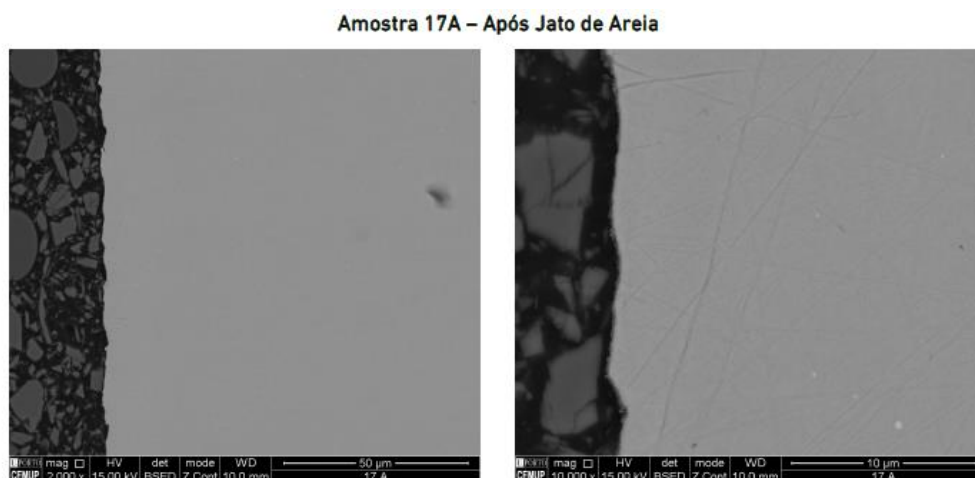


Figura 68 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 17 (zona funcional)

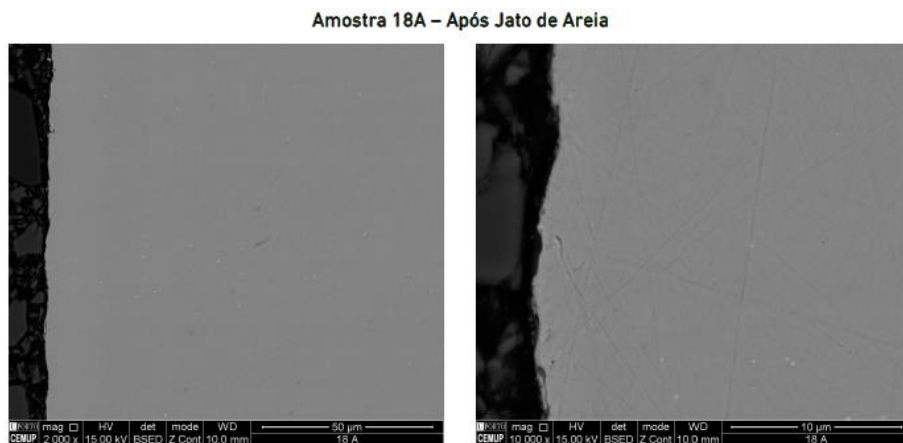


Figura 69 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 18 (zona funcional)

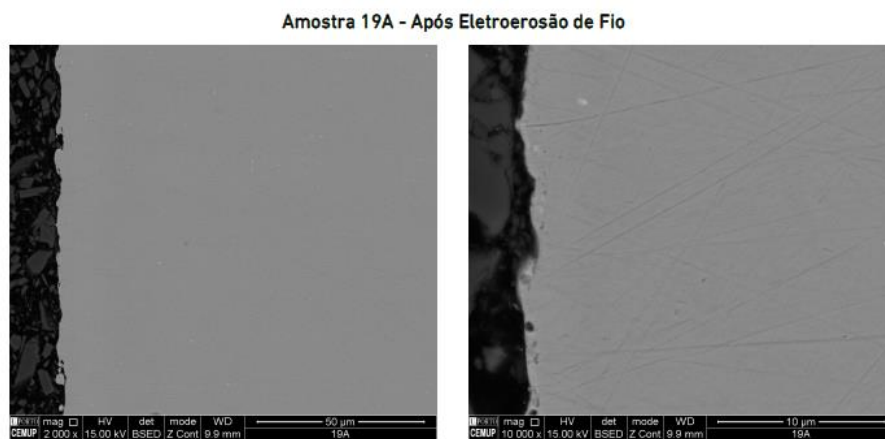


Figura 70 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 19 (zona funcional)

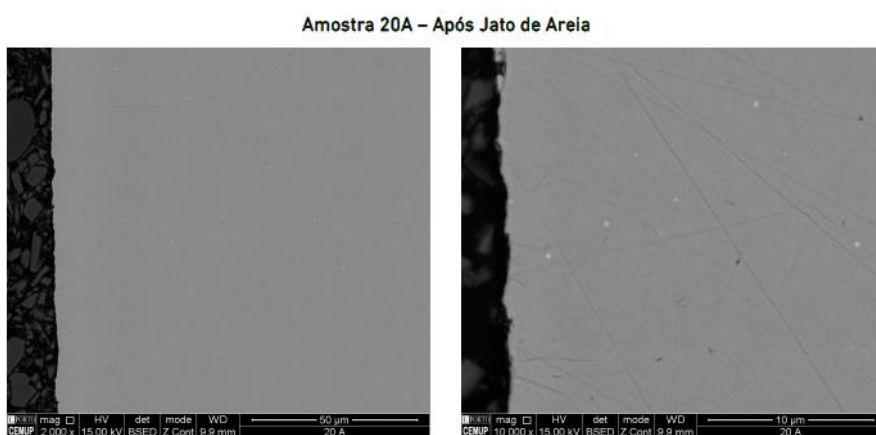


Figura 71 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 20 (zona funcional)

Os resultados alcançados para as ferramentas nº 21 e 22, idênticas entre si, a primeira proveniente de jato de areia e a segunda diretamente de eletroerosão, são semelhantes aos obtidos para as amostras nº 15 e 16. Deste modo, a amostra nº 21,

que sofreu projeção de jato de areia para remoção da camada branca, apresenta uma superfície lateral com maior uniformidade (Figura 72), enquanto a amostra nº 22 exhibe uma superfície lateral gerada por eletroerosão com presença de uma camada de material fundido pouco uniforme, criada pela descarga elétrica durante o processo (Figura 73).

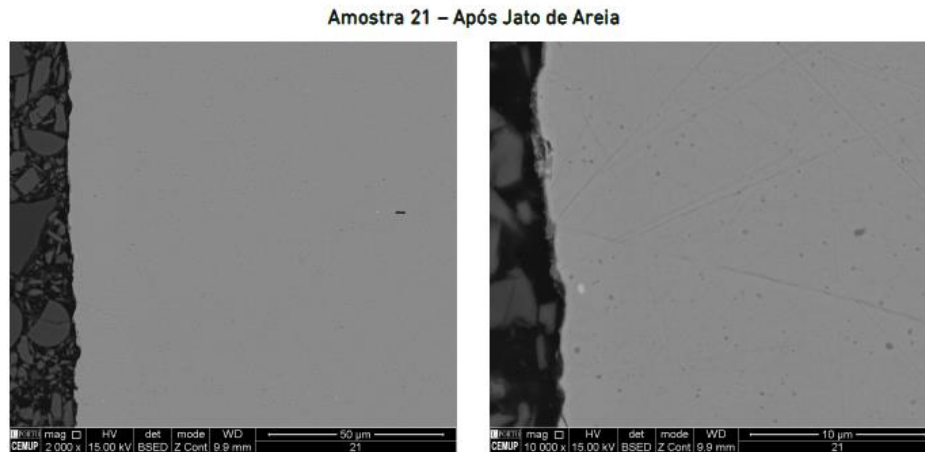


Figura 72 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 21 (zona funcional)

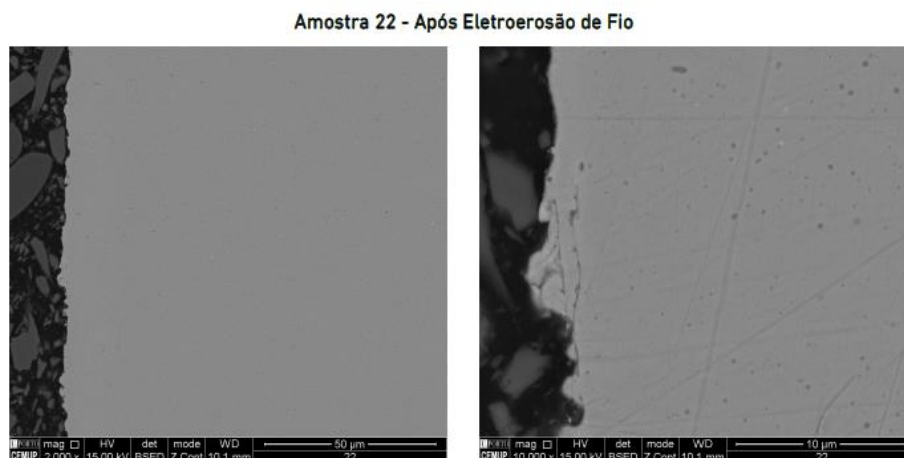


Figura 73 - Análise SEM da superfície lateral da ferramenta de cravação nº 22 (zona funcional)

Após ser efetuada a análise SEM-EDS às amostras referentes à parte funcional das ferramentas, com montagem metalográfica das mesmas, é de seguida exibida a análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação das ferramentas 17 a 20, sem montagem metalográfica em resina das amostras. Recorda-se que, destas ferramentas, apenas a número 19 é proveniente diretamente de eletroerosão de fio, sendo que as restantes sofreram projeção de jato de areia (microesferas de vidro).

Os resultados alcançados na análise SEM-EDS efetuada à superfície de cravação das ferramentas 17 a 20 (Figura 74 a Figura 77), sem montagem metalográfica das amostras, permitem concluir que mesmo as amostras provenientes de jato de areia

possuem resíduos originários do processo de eletroerosão de fio, nomeadamente pela presença de cobre e zinco na superfície de cravação. Deste modo, nas amostras 17, 18 e 20 parece não haver uma remoção completa da camada branca na superfície de cravação. Esta camada poderá contribuir para a diminuição da resistência mecânica e tenacidade do material. Visualmente, nesta superfície da zona funcional, as amostras exibem um aspeto acastanhado. A análise SEM-EDS revela ainda que nas zonas onde a presença de cobre e zinco é mais notória, o pico de oxigénio é superior, o que significa que a amostra se encontra oxidada.

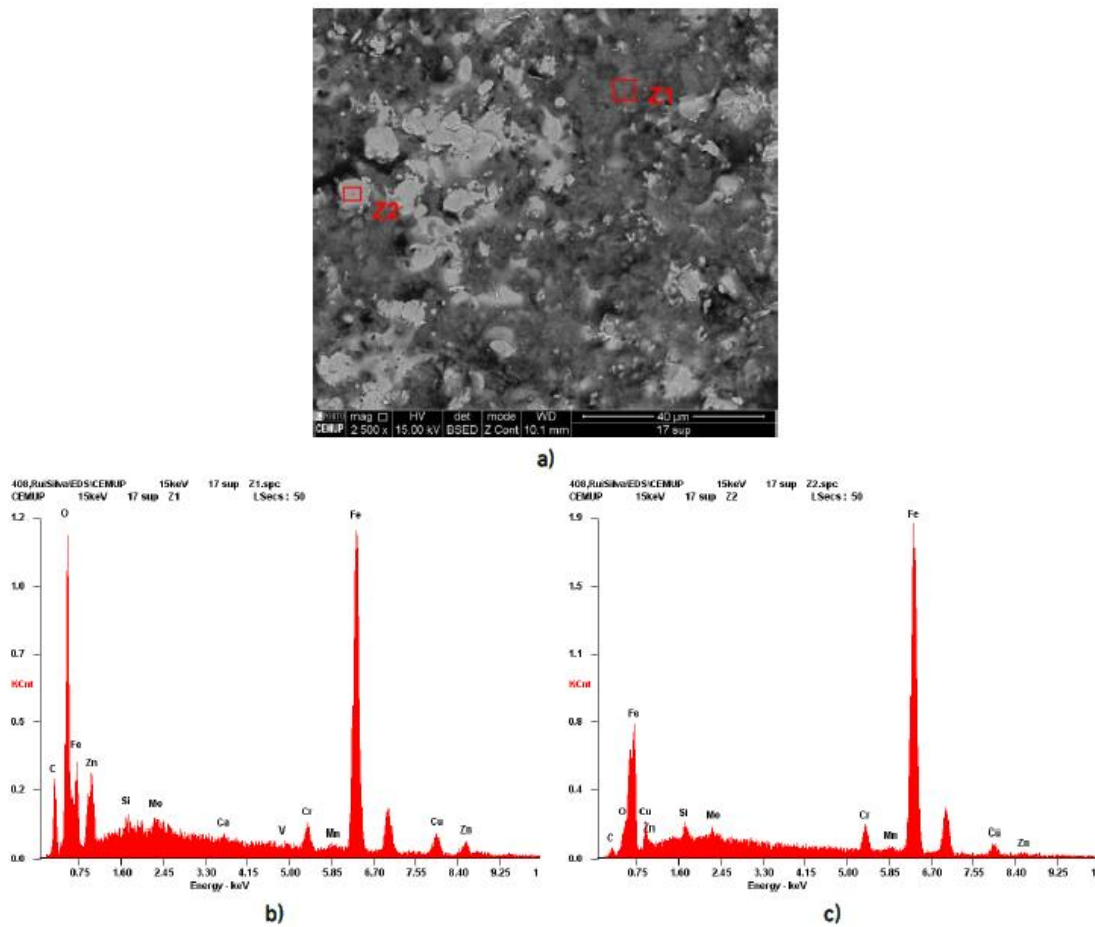


Figura 74 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra nº 17 sem montagem metalográfica: a) imagem SEM da amostra; b) espectro EDS referente à zona contaminada (Z1); c) espectro EDS relativo ao material base (Z2).

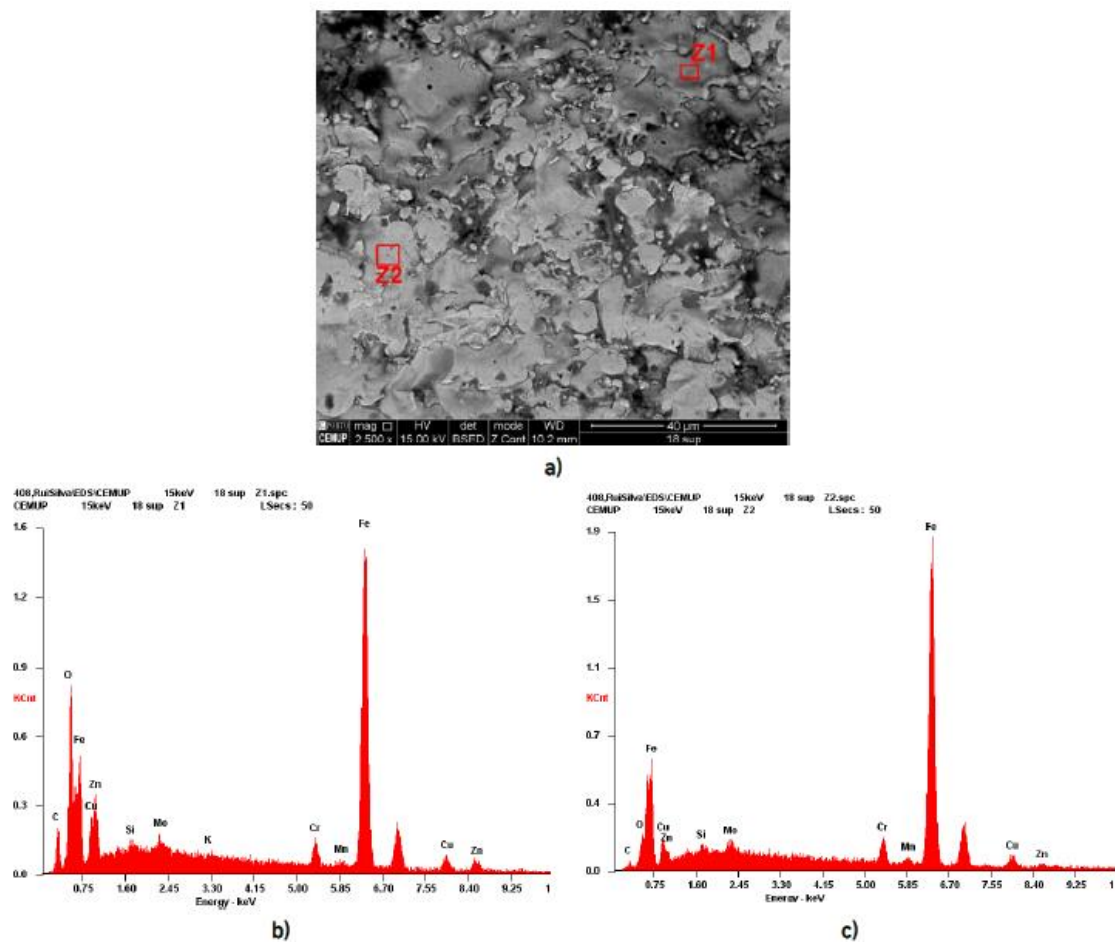
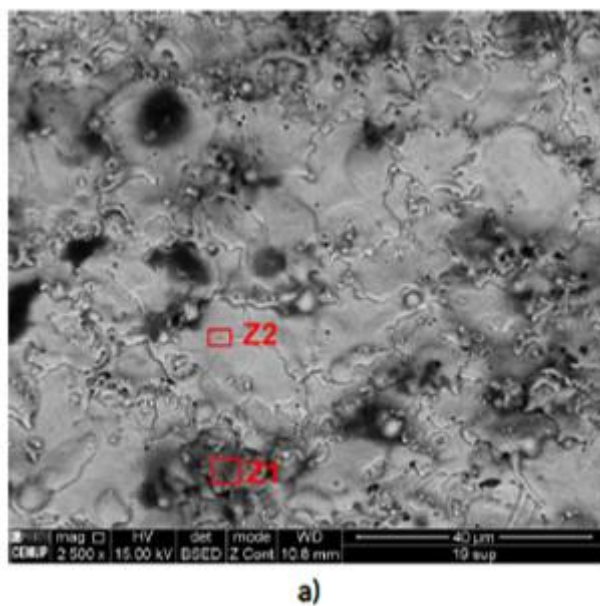


Figura 75 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra nº 18 sem montagem metalográfica: a) imagem SEM da amostra; b) espectro EDS referente à zona contaminada (Z1); c) espectro EDS relativo ao material base (Z2).



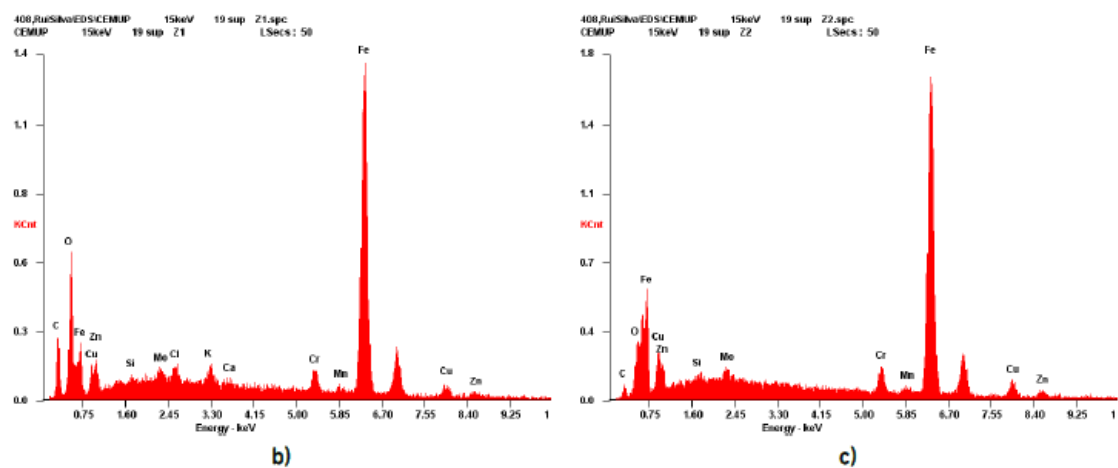


Figura 76 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra nº 19 sem montagem metalográfica: a) imagem SEM da amostra; b) espectro EDS referente à zona contaminada (Z1); c) espectro EDS relativo ao material base, mas ainda com contaminação (Z2).

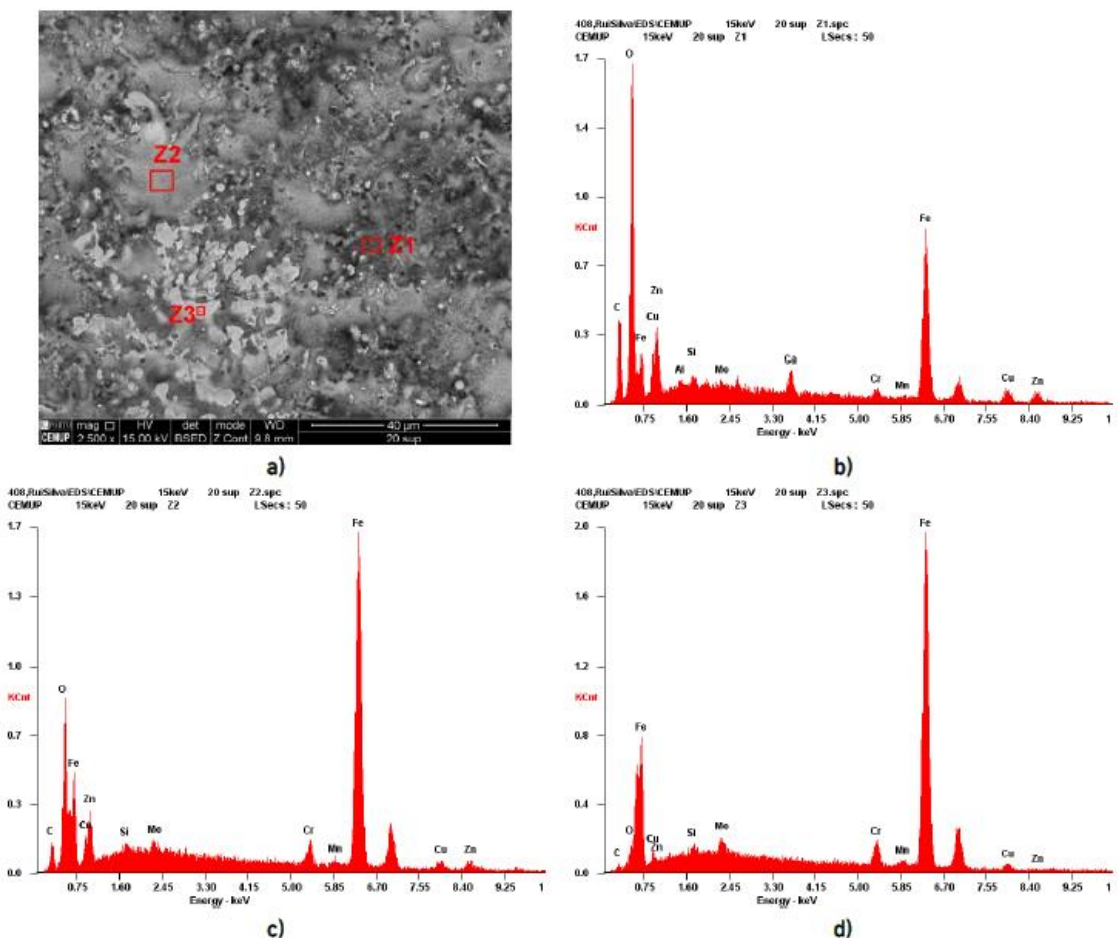


Figura 77 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra nº 20 sem montagem metalográfica: a) imagem SEM da amostra; b) espectro EDS referente à zona contaminada mais oxidada (Z1); c) espectro EDS referente à zona contaminada menos oxidada (Z2); d) espectro EDS relativo ao material base (Z3).

3.4.2.3 Determinação da rugosidade superficial

A Figura 78 e a Figura 79 exibem os resultados da medição da rugosidade na superfície lateral das ferramentas de cravação nº 15 a 22, nomeadamente: o desvio médio aritmético do perfil (R_a) e a média das alturas máximas do perfil de rugosidade (R_z). Tal como referido anteriormente, a rugosidade superficial foi medida numa zona contígua à zona funcional das ferramentas.

Realizando uma análise global dos resultados obtidos, constata-se que as superfícies laterais das ferramentas de cravação possuem um acabamento entre o fino ($0,2 \mu\text{m} \leq R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$) e o médio ($1,6 \mu\text{m} \leq R_a \leq 6,3 \mu\text{m}$), conseguindo-se fazer a seguinte distinção: amostras nº 15, 16, 21 e 22 – acabamento fino; amostras nº 17, 18, 19 e 20 – acabamento médio.

Para cada um dos diferentes tipos de ferramentas de cravação analisados, os valores de rugosidade superficial são da mesma ordem de grandeza após o processo de eletroerosão e após a projeção de jato de areia (microesferas de vidro) para remoção da camada branca.

Não obstante, para as ferramentas idênticas nº 15 e 16 verifica-se uma rugosidade ligeiramente superior na amostra saída diretamente de eletroerosão de fio ($R_a = 0,826 \mu\text{m}$), quando comparada com a amostra que sofreu projeção de jato de areia ($R_a = 0,614 \mu\text{m}$). Relativamente às amostras nº 18 e 19, a mesma tendência foi verificada, observando-se uma rugosidade mais elevada na amostra saída diretamente de eletroerosão ($R_a = 2,150 \mu\text{m}$), quando comparada com a amostra proveniente de jato de areia ($R_a = 1,907 \mu\text{m}$). Contrariamente, para as ferramentas de cravação nº 21 e 22, semelhantes entre si, foi registada uma rugosidade superficial mais reduzida na amostra após eletroerosão ($R_a = 0,664 \mu\text{m}$), comparativamente com a da amostra após projeção de jato de areia ($R_a = 0,789 \mu\text{m}$).

Ferramenta	Etapa	Rugosidade Superficial – R_a (μm)				
		Ra (1ª medição)	Ra (2ª medição)	Ra (3ª medição)	Ra Média	Desvio Padrão
15	Jato Areia	0,567	0,687	0,588	0,614	0,064
16	Erosão	0,760	0,803	0,915	0,826	0,080
17	Jato Areia	2,082	2,872	2,311	2,422	0,406
18	Jato Areia	1,986	1,888	1,847	1,907	0,071
19	Erosão	2,157	2,159	2,135	2,150	0,013
20	Jato Areia	1,922	1,994	1,747	1,888	0,127
21	Jato Areia	0,877	0,853	0,637	0,789	0,132
22	Erosão	0,620	0,721	0,650	0,664	0,052

Figura 78 - Resultados da medição da rugosidade superficial – desvio médio aritmético do perfil, R_a .

Ferramenta	Etapa	Média das alturas máximas do perfil de rugosidade – Rz (μm)				
		Rz (1ª medição)	Rz (1ª medição)	Rz (1ª medição)	Rz Média	Desvio Padrão
15	Jato Areia	4,935	6,255	4,953	5,381	0,757
16	Erosão	7,014	7,465	7,936	7,472	0,461
17	Jato Areia	11,638	15,019	13,598	13,418	1,698
18	Jato Areia	11,679	10,6	10,034	10,771	0,836
19	Erosão	12,134	12,91	12,803	12,616	0,421
20	Jato Areia	9,621	11,293	9,434	10,116	1,024
21	Jato Areia	8,081	7,195	5,103	6,793	1,529
22	Erosão	4,83	6,335	5,256	5,474	0,776

Figura 79 - Resultados da medição da média das alturas máximas do perfil de rugosidade, Rz.

3.4.2.4 Determinação da dureza

A Figura 80 exibe os resultados das medições das durezas (HV1) do material base das ferramentas nº 15 a 22.

A análise geral dos resultados permite constatar que as ferramentas de cravação produzidas com o aço AISI S7 (ferramentas nº 17, 18, 19 e 20) apresentam dureza superior às restantes, produzidas com o aço AISI H13 (ferramentas nº 15, 16, 21 e 22). Deste modo, para as ferramentas produzidas com o aço AISI S7 foram alcançadas durezas médias na gama de valores de 696 – 717 HV, enquanto nas fabricadas com o aço AISI H13 foram obtidas durezas médias de 590 – 647 HV.

Este resultado é coerente com o estado de arte (Hudson, 2022), dado que o aço AISI S7 pode atingir uma dureza de aproximadamente 60 HRC (735 HV), enquanto o aço AISI H13 apenas consegue alcançar uma dureza de 53 - 56 HRC (580 - 660 HV), dependendo das condições de revenido.

Medição	Amostra							
	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22
1ª	597	605	704	706	714	691	652	652
2ª	575	620	700	718	720	716	666	627
3ª	598	630	690	714	716	680	622	629
Média	590	618	698	713	717	696	647	636
Desvio Padrão	13,00	12,58	7,21	6,11	3,06	18,45	22,48	13,89

Figura 80 - Resultados da medição das durezas (HV1) do material base das amostras

3.4.3 Conclusões – Caracterização de ferramentas em diferentes etapas do processo produtivo

A Tabela 15 sumariza os resultados alcançados na caracterização das ferramentas de cravação em diferentes etapas do processo produtivo, nomeadamente saídas diretamente do processo de eletroerosão de fio e submetidas posteriormente a projeção de jato de areia (microesferas de vidro) para remoção da camada branca.

Tabela 15 - Quadro-resumo das características das ferramentas de cravação, em diferentes etapas do processo produtivo, submetidas a análise.

Amostra nº	Fab.	Etapa	Referência	Material	Dureza do material base [HV]	Rugosidade Ra/Rz [μm]
15	R&B	Jato areia	BAW2292100 420.N	AISI H13	590	0,614/5,381
16	R&B	Erosão	BAW2292100 420.N	AISI H13	618	0,826/7,472
17	R&B	Jato areia	DWB2290630 25.N	AISI S7*	698	2,422/13,418
18	R&B	Jato areia	FIB33006292 5.N	AISI S7	713	1,907/10,771
19	R&B	Erosão	FIB33006292 5.N	AISI S7	717	2,150/12,616
20	R&B	Jato areia	DWB2290630 25.N	AISI S7	696	1,888/10,116
21	R&B	Jato areia	CAI33020502 50.N	AISI H13	647	0,789/6,793
22	R&B	Erosão	CAI33020502 50.N	AISI H13	636	0,664/5,474

*Teor de Vanádio Superior ao previsto na composição química normalizada do aço.

Os resultados de espectrometria de emissão ótica confirmaram a utilização de um aço AISI H13 nas amostras nº 15, 16, 21 e 22 e de um aço AISI S7 nas ferramentas nº 17, 18, 19 e 20. As distintas análises SEM-EDS, realizadas com e sem montagem metalográfica das amostras, demonstraram a existência de uma diferença no

acabamento superficial das amostras saídas diretamente de eletroerosão e das amostras submetidas a projeção de jato de areia. Deste modo, as ferramentas provenientes de jato de areia apresentam uma superfície lateral com maior uniformidade, enquanto as ferramentas saídas de eletroerosão possuem uma camada de material fundido pouco uniforme, gerada pela descarga elétrica intrínseca ao processo. Não obstante, na superfície de cravação das ferramentas nº 17, 18 e 20, provenientes de jato de areia, ainda se visualizam resíduos gerados pelo processo de eletroerosão de fio (presença de cobre e zinco), não havendo uma remoção efetiva da camada branca da zona funcional da ferramenta. Esta camada poderá contribuir para a diminuição da resistência mecânica e tenacidade do material. Adicionalmente, a presença destes resíduos pode comprometer ou dificultar a adesão de posteriores revestimentos. Macroscopicamente, nesta superfície da zona funcional, as amostras exibem um aspeto acastanhado. Analisados os resultados obtidos nas análises SEM-EDS, conclui-se que o processo de jato de areia poderá comprometer a durabilidade das ferramentas atualmente produzidas, sendo um alvo para futuras melhorias.

Em termos de rugosidade superficial, constatou-se uma diferença notória entre as superfícies laterais das ferramentas nº 15, 16, 21 e 22, que possuem um acabamento fino ($0,2 \mu\text{m} \leq Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$), e as superfícies laterais das amostras nº 17, 18, 19 e 20, que possuem um acabamento médio ($1,6 \mu\text{m} \leq Ra \leq 6,3 \mu\text{m}$). Estes resultados reforçam ainda mais a necessidade de melhorias no processo que sucede a operação de erosão de fio.

Relativamente à dureza do material base das ferramentas de cravação, as amostras produzidas com o aço AISI H13 (ferramentas nº 15, 16, 21 e 22) apresentaram menor dureza quando comparados com as ferramentas produzidas com o aço AISI S7 (ferramentas nº 17, 18, 19 e 20). Assim sendo, nas ferramentas produzidas com o aço AISI S7 foram alcançadas durezas médias na gama 696 – 717 HV, enquanto nas fabricadas com o aço AISI H13 foram obtidas durezas médias de 590 – 647 HV.

3.5 Caracterização de ferramentas de cravação sujeitas a ciclos de utilização

3.5.1 Procedimento experimental

Dados os resultados obtidos anteriormente, procurou-se conseguir melhorar a etapa que sucede à operação de jato de areia. Com o objetivo de conseguir uma remoção mais eficaz da camada branca e a obtenção de um acabamento mais fino da zona funcional dos *crimpers*, decidiu-se realizar uma operação de polimento após o tratamento de jato de areia. Este método é utilizado noutros componentes da R&B para atingir objetivos semelhantes aos que se pretendem obter neste caso em específico, sendo, ao que tudo indica, uma solução bastante adequada, dados os meios que a R&B dispõe. O polimento é um processo bastante importante para a fabricação

de moldes e matrizes. Em vez de alterar a forma geométrica da superfície, o objetivo é reduzir a rugosidade da superfície para a condição necessária. A rugosidade da superfície a ser alcançada no processo de polimento depende principalmente da escolha dos abrasivos e, em particular, do tamanho do grão (Ngan & Tam, 2004).

O polimento é um processo com vários estágios, onde microperfis são desenvolvidos na superfície durante o polimento e as suas direções seguem as direções da fricção das partículas abrasivas. Quando um estágio estiver concluído, os perfis do estágio anterior devem ter desaparecido e restam apenas os perfis do estágio atual, uma vez que a direção de atrito é distinta para cada local da superfície entre o estágio atual e o estágio anterior de polimento. O desaparecimento dos perfis com direções diferentes da direção de atrito atual pode ser usado para sinalizar a conclusão do estágio em execução (Ngan & Tam, 2004).

O polimento efetuado pela Ricardo & Barbosa divide-se em duas etapas: limpeza inicial e acabamento. Um disco de feltro duro é utilizado em ambas as etapas, sendo este tipo de disco bastante utilizado para operações de polimento a nível industrial (Lin et al., 2008; Ponnanna et al., 2001). Na etapa de limpeza inicial é utilizada uma pasta diamantada com uma granulometria de 6 μm e na etapa de acabamento utiliza-se uma pasta diamantada com uma granulometria de 1 μm . Este tipo de pastas conseguem assegurar um acabamento perfeito devido à sua concentração, pelo que são muito utilizadas na indústria de moldes (Graphite, 2017).

A Tabela 16 exhibe a ferramenta de cravação produzida pela Ricardo & Barbosa já com a etapa de polimento implementada no seu processo produtivo. Esta ferramenta em específico possui duas zonas de cravação, ambas sujeitas a ciclos de utilização por um cliente da R&B. Uma das zonas de cravação conseguiu atingir os 500 000 ciclos de cravações conformes, havendo uma melhoria superior a 100% face aos 200 000 ciclos normalmente obtidos. A outra zona de cravação foi sujeita a 30 000 ciclos de cravação antes de a sua utilização ser interrompida para a zona ser analisada. Esta amostra foi submetida a análise com o objetivo de estudar e quantificar o desgaste da ferramenta ao longo do seu ciclo de vida, assim como avaliar a preservação das soluções de revestimento superficial e melhorias adotadas na ferramenta. Deste modo, foi examinada uma ferramenta de cravação com duas zonas funcionais, a primeira com 500 000 ciclos de utilização e a segunda com 30 000 ciclos.

Para ambos os lados da ferramenta 23, correspondentes a ciclos de utilização distintos, lado A (500.000 ciclos) e lado B (30.000 ciclos), foram extraídas duas amostras da zona de cravação, de acordo com o esquematizado na Figura 81.

Tabela 16 - Identificação das ferramentas com ciclos de utilização submetidas a análise.

Amostra Nº	Fabricante	Referência	Material	Revestimento superficial	Comentários
23 A	R&B	DWB229063025.N	AISI S7	Crómio duro	500 000 ciclos de utilização
23 B	R&B	DWB229063025.N	AISI S7	Crómio duro	30 000 ciclos de utilização

Posteriormente, a ferramenta 23 e respetivas amostras foram caracterizadas recorrendo aos seguintes ensaios:

- Espectrometria de emissão ótica (análise da composição química do material base);
- Microscopia eletrónica de varrimento de alta resolução com microanálise por raios x (análise SEM/EDS);
- Ensaio de dureza.

A determinação da composição química da matéria-prima da ferramenta por espectrometria de emissão ótica, foi realizada após lixagem da sua superfície com o intuito de eliminar o revestimento de crómio duro presente e, à semelhança das caracterizações anteriores, o equipamento utilizado foi também o espectrómetro FM EXPERT da fabricante Hitachi.

A análise SEM-EDS foi realizada em duas etapas complementares: a primeira sem montagem metalográfica em resina das zonas funcionais das ferramentas, para visualização da superfície de cravação e existência de possíveis indícios de desgaste, e a segunda com montagem metalográfica dos cortes transversais A1, A2, B1 e B2, com o objetivo de verificar a uniformidade e espessura do revestimento de crómio existente na zona funcional das ferramentas. Para ambas as etapas, foi utilizado o equipamento FEI Quanta 400FEG (análise SEM), equipado com um espectroscópio EDAX Genesis X-ray (análise EDS).

A determinação da dureza foi realizada após montagem metalográfica das zonas funcionais das ferramentas de cravação, através da medição de durezas (HV1), com o intuito de averiguar se existe alteração do seu valor na zona útil das ferramentas com a execução de ciclos de utilização. À semelhança das medições de dureza anteriores, o equipamento utilizado foi um durómetro Vickers HM-200 do fabricante Mitutoyo.



Figura 81 - Identificação dos cortes realizados e respetivas amostras extraídas da ferramenta de cravação nº 23: lado 23A – 500.000 ciclos de utilização; lado 23B – 30.000 ciclos de utilização.

3.5.2 Análise de resultados

3.5.2.1 Análise química

A composição química determinada para o material base da ferramenta de cravação nº 23 pode ser visualizada na Tabela 17. Esta composição é coincidente com a do aço AISI S7 (1.2355 / ISO 50CrMoV13-15) – aço para ferramentas resistente ao choque. Em contrapartida, o único elemento de liga que se apresenta em não conformidade com a composição química normalizada do aço AISI S7 (Anexo 1 - Figura 98) é o crómio, cujo teor é bastante elevado (4,58 %wt) relativamente ao intervalo especificado (3 – 3,5 %wt). No entanto considera-se que o teor obtido para este elemento está, certamente, a ser influenciado pela existência de resíduos do revestimento de crómio duro presente na superfície da ferramenta de cravação.

Tabela 17 - Composição química obtida para o material base da amostra 23.

Ref ^a da amostra	Composição química em %wt								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
23	0,45	0,27	0,65	0,02	0,003	4,58	1,35	0,14	0,02
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
	0,06	0,003	0,11	0,009	0,006	0,007	<0,001	92,2	

3.5.2.2 Análise SEM-EDS

Os resultados da análise SEM-EDS efetuada à superfície de cravação (zona funcional) da amostra 23A1 (500.000 ciclos de utilização, “dente” grande), sem montagem metalográfica em resina da amostra, encontram-se apresentados entre a Figura 82 e a Figura 84. Na Figura 82 é patente a existência de desgaste da camada superficial de crómio duro, dada a existência de riscos e zonas de arrasto de material do

revestimento. Adicionalmente, na Figura 83 estão identificadas zonas onde o material base (aço AISI S7) da amostra já se encontra exposto (ex: Z4), com confirmação através do respetivo espectro EDS (Figura 83c)), significando que a camada de crómio já se encontra corrompida nestas áreas. Nesta figura, constata-se que as partículas brancas presentes na amostra (ex: Z1) correspondem a depósitos de estanho (Sn) provenientes dos conectores elétricos cravados.

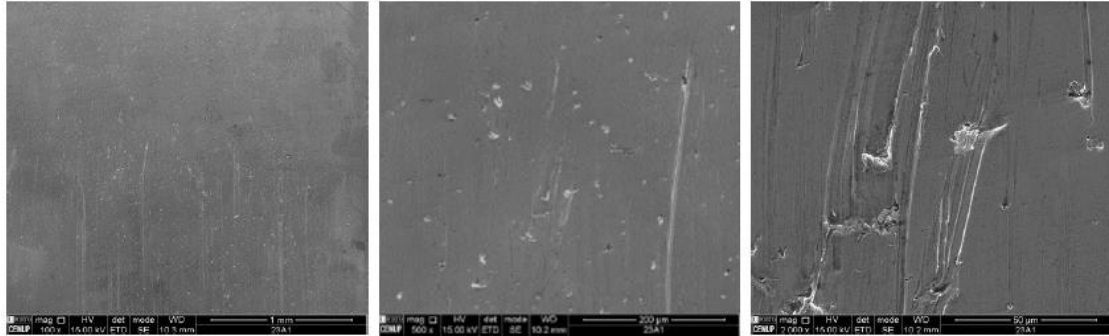


Figura 82 - Análise SEM realizada à superfície de cravação da amostra 23A1

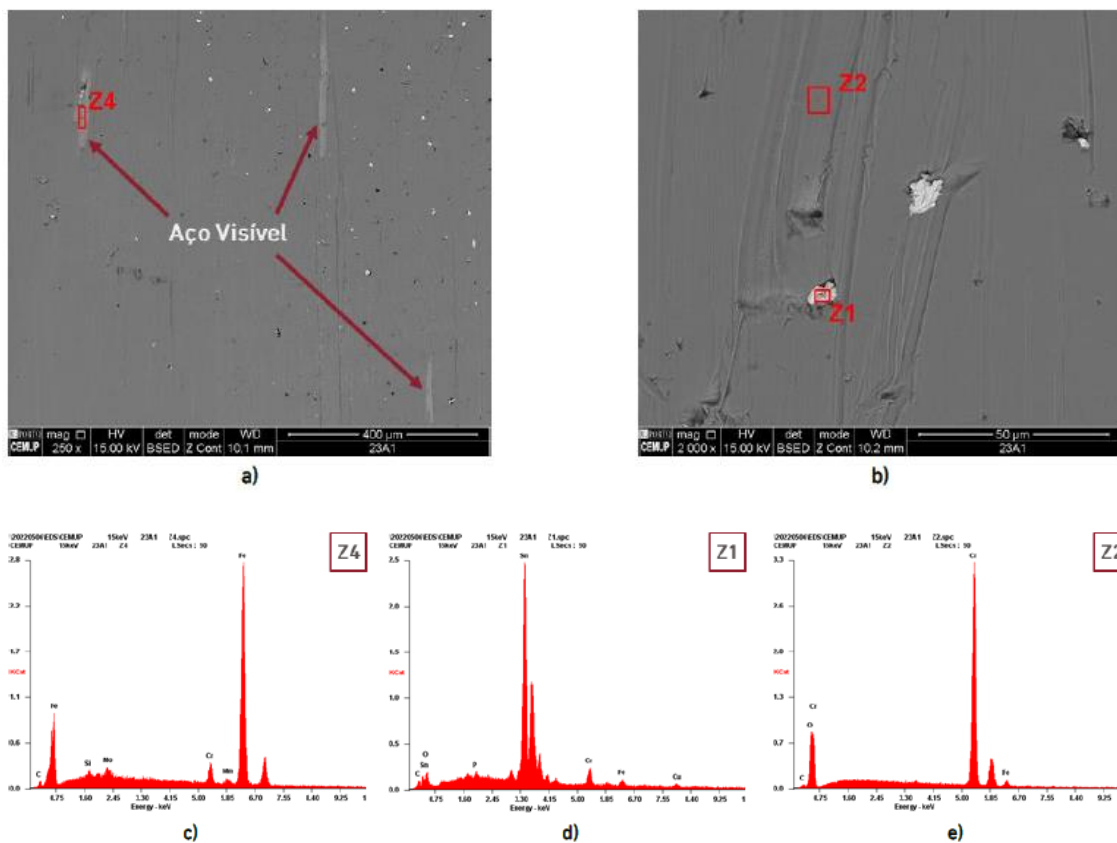


Figura 83 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra 23A1: a) identificação de zonas com material base visível; b) análise SEM-EDS na zona de arrasto de material; c) espectro EDS obtido para o material base (Z4); d) Espectro EDS – partícula de estanho (Z1); e) Espectro EDS obtido para o revestimento de crómio (Z2)

Analisando as zonas de “arrasto” de material na superfície de cravação da amostra 23A1 com uma ampliação superior (Figura 84), é possível observar a fissuração transversal da camada de revestimento de crómio duro nestas zonas, denotando-se a existência de estanho (Sn), proveniente dos conectores elétricos, depositado nas fissuras.

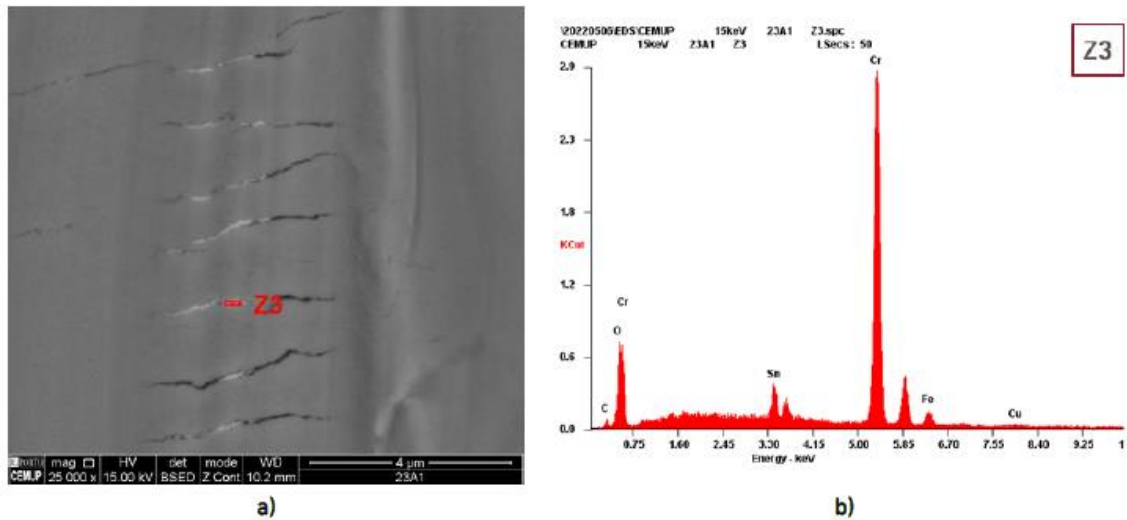


Figura 84 - Continuação da análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra 23A1: a) presença de fissuração da camada de revestimento na zona de “arrasto” de material; b) espectro EDS na zona de fissuração.

Os resultados da análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra 23A2 (500.000 ciclos de utilização, “dente” pequeno), mostram que o desgaste da camada superficial de crómio é bastante considerável, existindo uma quantidade elevada de riscos e zonas de arrasto de material. Através da visualização das imagens SEM apresentadas na Figura 85, verifica-se que nesta amostra existe uma maior quantidade de zonas onde o aço está exposto – riscos com cor mais esbranquiçada. Nestas zonas, o material base da amostra está visível e a camada de crómio duro encontra-se corrompida.

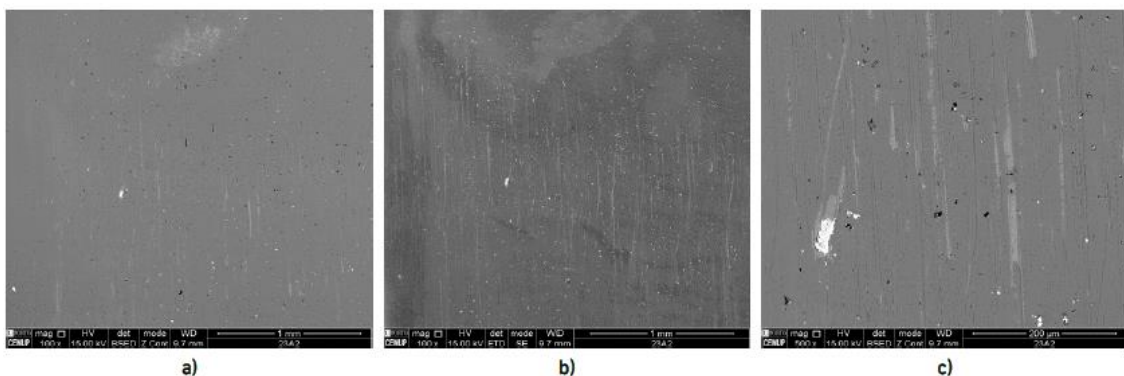


Figura 85 - Análise SEM realizada à superfície de cravação da amostra 23A2

A Figura 86 e a Figura 87 exibem os resultados da análise SEM-EDS efetuada à superfície de cravação (zona funcional) da amostra 23B1 (30.000 ciclos de utilização, “dente” grande), sem montagem metalográfica em resina. No geral, tal como expectável dada a diferença no número de ciclos de utilização, verifica-se uma menor quantidade de riscos comparativamente ao observado para a amostra 23A. Contudo, em algumas zonas, o material base já se encontra exposto (Figura 86). Na Figura 87b) são evidentes as zonas onde o aço já se encontra visível (ex: Z1), ou seja, zonas onde a camada de revestimento de crómio duro já foi removida, bem como as zonas onde a camada superficial de crómio permanece intacta, mas possui uma espessura reduzida (ex: Z2). Na Figura 87c) e d) são apresentados os espectros EDS que sustentam estas conclusões.

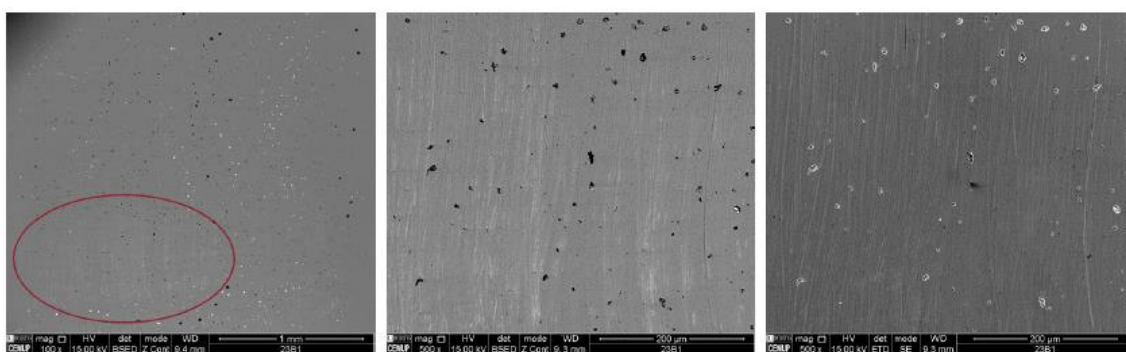


Figura 86 - Análise SEM realizada à superfície de cravação da amostra 23B1

Os resultados da análise SEM-EDS executada à superfície de cravação da amostra 23B2 (30.000 ciclos de utilização, “dente” pequeno), sem montagem metalográfica em resina, estão expostos na Figura 88. As imagens obtidas evidenciam a presença de uma reduzida quantidade de riscos (riscos verticais ténues), sendo o desgaste superficial praticamente inexistente na amostra em questão. O espectro EDS apresentado na Figura 88d) comprova que, na amostra 23B2, o revestimento de crómio duro permanece praticamente intacto. Tal como sucedia nas amostras anteriores, nesta também se observam várias partículas brancas correspondentes a depósitos de estanho (Sn) provenientes dos terminais elétricos cravados.

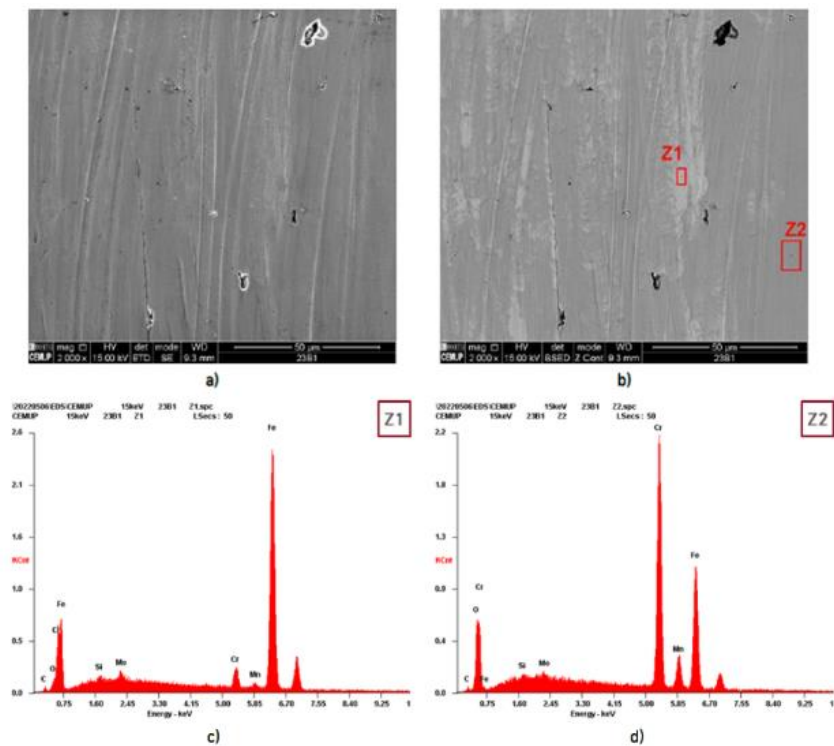


Figura 87 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra 23B1: a) identificação de zonas de riscos e material base visível; b) análise SEM-EDS na zona dos riscos; c) espectro EDS – material base visível (Z1); d) espectro EDS – revestimento de cromo pouco espesso (Z2).

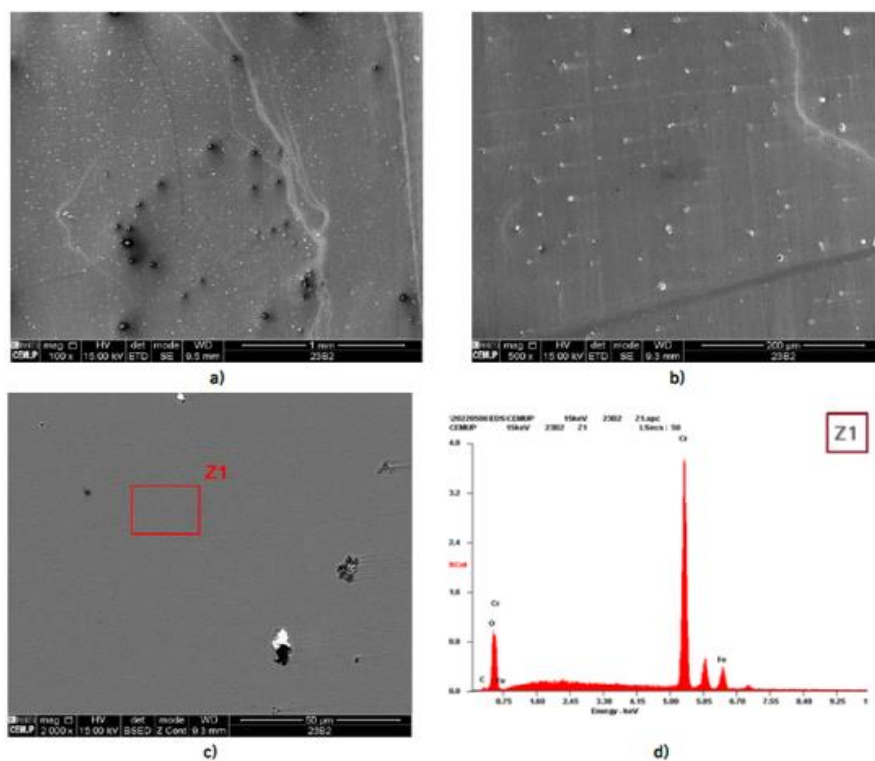


Figura 88 - Análise SEM-EDS realizada à superfície de cravação da amostra 23B2: a) e b) análise SEM; c) análise SEM-EDS à camada de revestimento; d) espectro EDS – revestimento de cromo (Z1).

Os resultados alcançados na análise SEM-EDS efetuada à superfície de cravação das amostras, sem montagem metalográfica em resina, são de seguida validados e complementados através da análise SEM-EDS das montagens metalográficas dos cortes transversais às superfícies estudadas. Esta caracterização permitirá confirmar a uniformidade e espessura do revestimento de crómio existente, ou não, na zona funcional das ferramentas 23A e 23B.

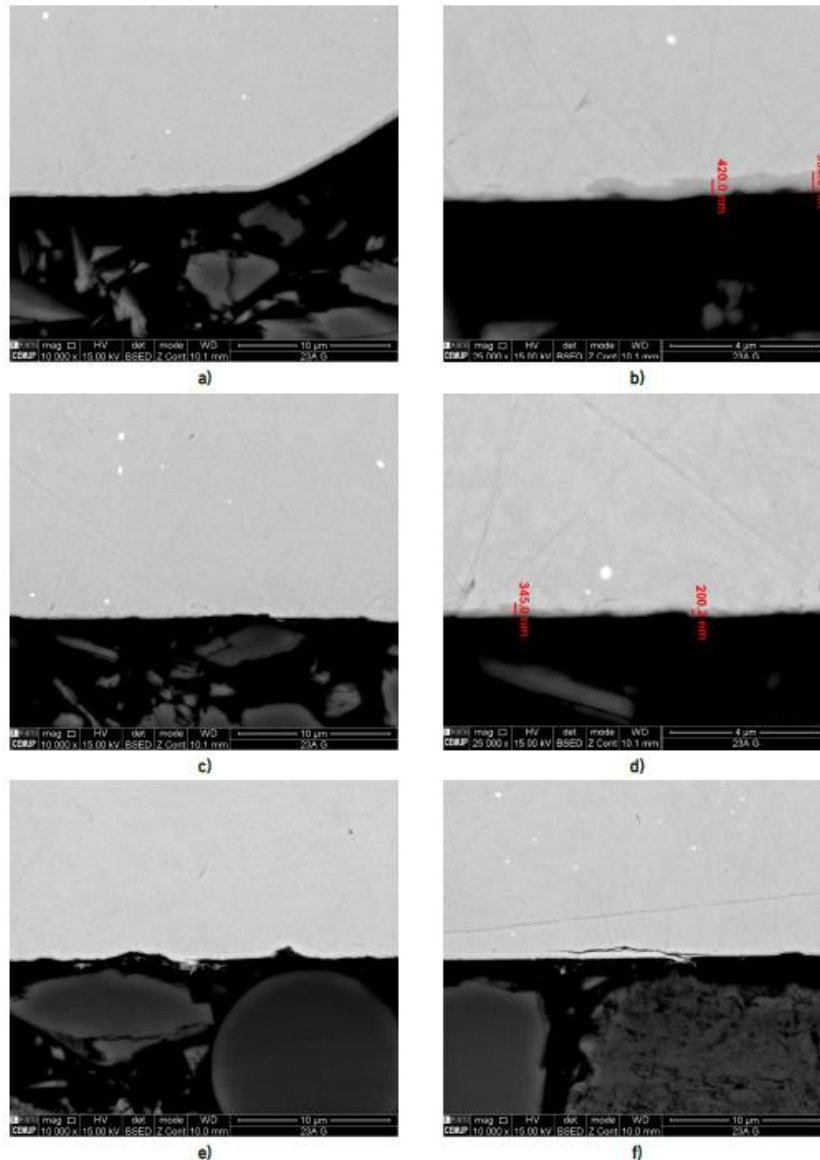


Figura 89 - Caracterização metalográfica (análise SEM) realizada à amostra 23A1: a) presença de revestimento na periferia da superfície de cravação; b) espessura do revestimento na periferia da superfície de cravação; c) resíduos/ ausência de revestimento no centro da superfície de cravação; d) espessura do revestimento no centro da superfície de cravação; e) cavidades na superfície de cravação; f) fissura do material base na zona funcional.

Assim sendo, a Figura 89 apresenta os resultados da análise SEM-EDS efetuada à amostra 23A1 (500.000 ciclos de utilização, “dente” grande), com montagem metalográfica em resina. Através das imagens obtidas, é possível verificar que a

amostra possui na sua periferia um revestimento contínuo de cromo duro, com espessura de 420 – 550 nm (Figura 89a e b)), e que este se vai tornando praticamente inexistente ou residual à medida que se vai avançando para o centro da superfície de cravação (Figura 89c e d)), perdendo-se grande parte do revestimento e respetiva uniformidade. Na Figura 89e) e f) são também visíveis alguns defeitos presentes na superfície de cravação desta ferramenta, tais como cavidades, geradas pelos riscos observados anteriormente, e fissuras do material base na zona funcional.

Os resultados da análise SEM-EDS efetuada à amostra 23A2 (500.000 ciclos de utilização, “dente” pequeno), com montagem metalográfica em resina, evidenciam uma fragmentação e não uniformidade do revestimento de cromo duro na superfície de cravação desta amostra (Figura 90). Adicionalmente, constata-se uma falta de aderência do revestimento ao substrato. Nas zonas fragmentadas ainda é visível revestimento com uma espessura de, aproximadamente, 1,29 μm (Figura 90d)).

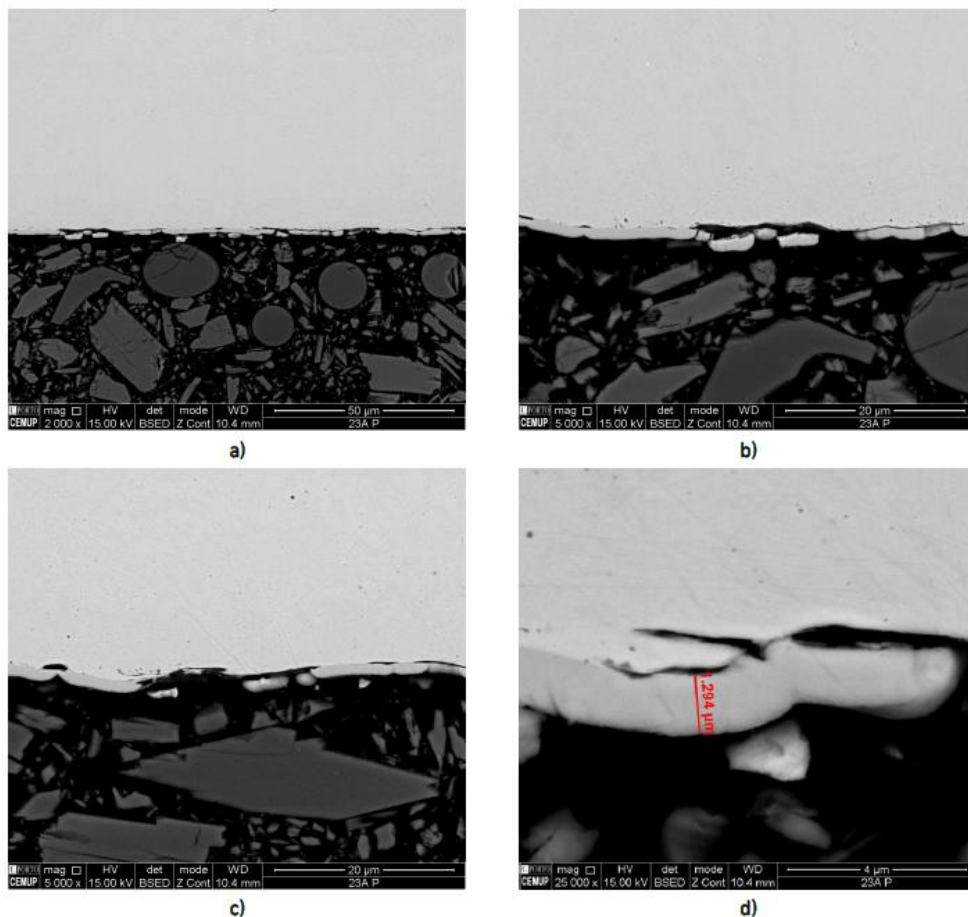
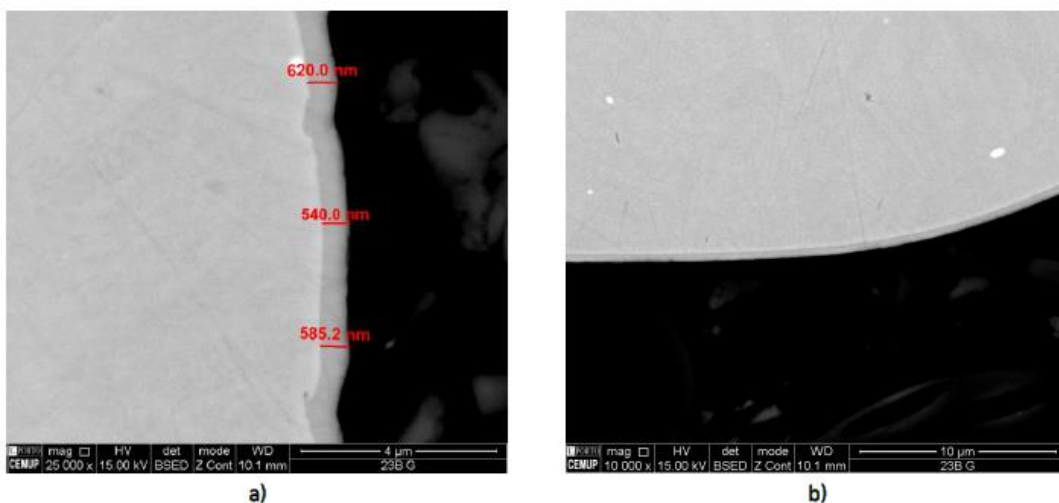


Figura 90 - Caracterização metalográfica (análise SEM) realizada à amostra 23A2: fragmentação e ausência de revestimento: a) e b) análise da zona 1; c) análise da zona 2; d) espessura do revestimento na zona fragmentada.

A Figura 91 exibe os resultados da análise SEM-EDS efetuada à amostra 23B1 (30.000 ciclos de utilização, “dente” grande), com montagem metalográfica em resina. Pelas imagens obtidas, é possível constatar que a amostra possui na superfície transversal à

superfície de cravação um revestimento contínuo e uniforme com uma espessura de 540 – 620 nm (Figura 91a)). Este revestimento de crómio duro mantém-se contínuo na periferia da superfície de cravação (Figura 91b)), embora a sua espessura comece a diminuir para os 390 – 410 nm nesta região (Figura 91c)). À medida que se avança para o centro da superfície de cravação, a espessura do revestimento de crómio vai diminuindo para os 130 nm (Figura 91d)). De um modo geral, o revestimento na amostra 23B1, sujeita a 30.000 ciclos de utilização, apresenta um aspeto contínuo e com boa adesão ao material base, embora no centro da superfície de cravação haja perda de uniformidade e se verifiquem algumas cavidades geradas pelo processo de cravação dos conectores elétricos e exposição do material base (Figura 91e) e f)).

Os resultados alcançados para a amostra 23B2 (30.000 ciclos de utilização, “dente” pequeno), com montagem metalográfica em resina (Figura 92), mostram, maioritariamente no centro da superfície de cravação, a fragmentação e não uniformidade do revestimento de crómio duro (Figura 92c)). Nesta zona, o revestimento apresenta uma espessura de 1,25 – 1,54 μm (Figura 41d) e e)). Comparativamente com a amostra 23A2 (500.000 ciclos de utilização, “dente” pequeno), a fragmentação visualizada na superfície de cravação da amostra 23B2 é menor, havendo maior conservação da adesão do revestimento de crómio ao substrato. Este resultado é coerente com a diferença no número de ciclos de utilização de cada uma das amostras. Um defeito visualizado na zona funcional da amostra 23B2, que não tinha sido observado anteriormente, é a fissuração do material base, com propagação da fissura transversalmente à superfície de cravação (Figura 92b) e f)). Contudo, estas fissuras aparentam ser prévias ao processo de cravação, dado que na Figura 92f) existe a fissuração do substrato (aço AISI S7), mas não se visualiza a fissuração do revestimento de crómio duro. Em ambos os casos, estas fissuras encontram-se rodeadas por óxidos de crómio e manganês (pontos escuros nas imagens SEM correspondentes).



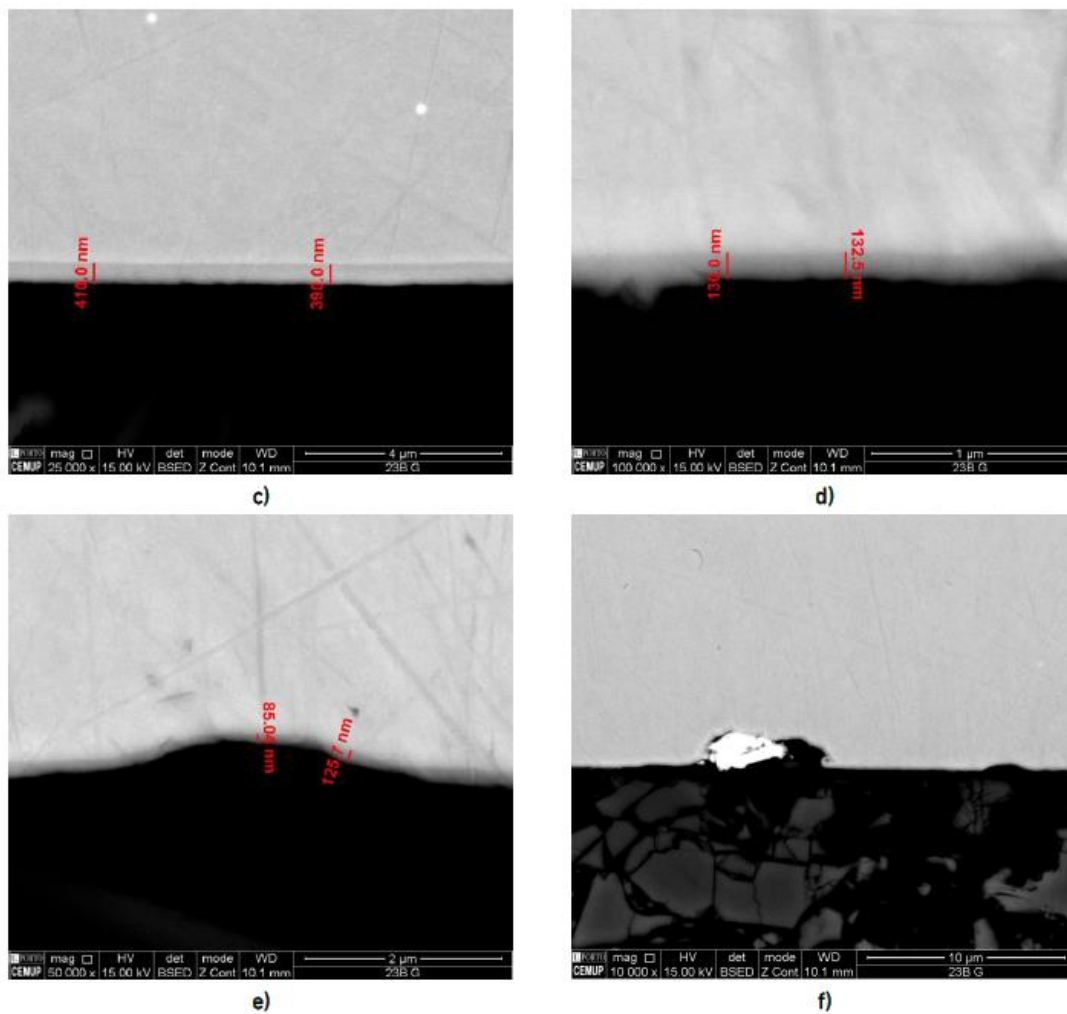
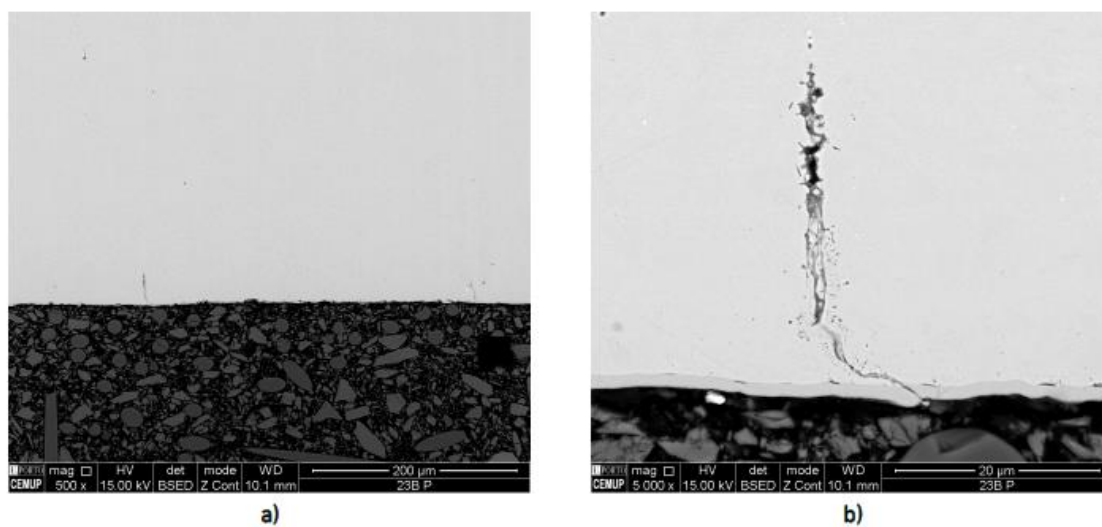


Figura 91 - Caracterização metalográfica (análise SEM) realizada à amostra 23B1: a) espessura de revestimento fora da superfície de cravação; b) revestimento contínuo na periferia da superfície de cravação; c) espessura de revestimento na periferia da superfície de cravação; d) espessura de revestimento no centro da superfície de cravação; e) cavidade na superfície de cravação; f) partícula de estanho (Sn) alojada numa cavidade na superfície de cravação.



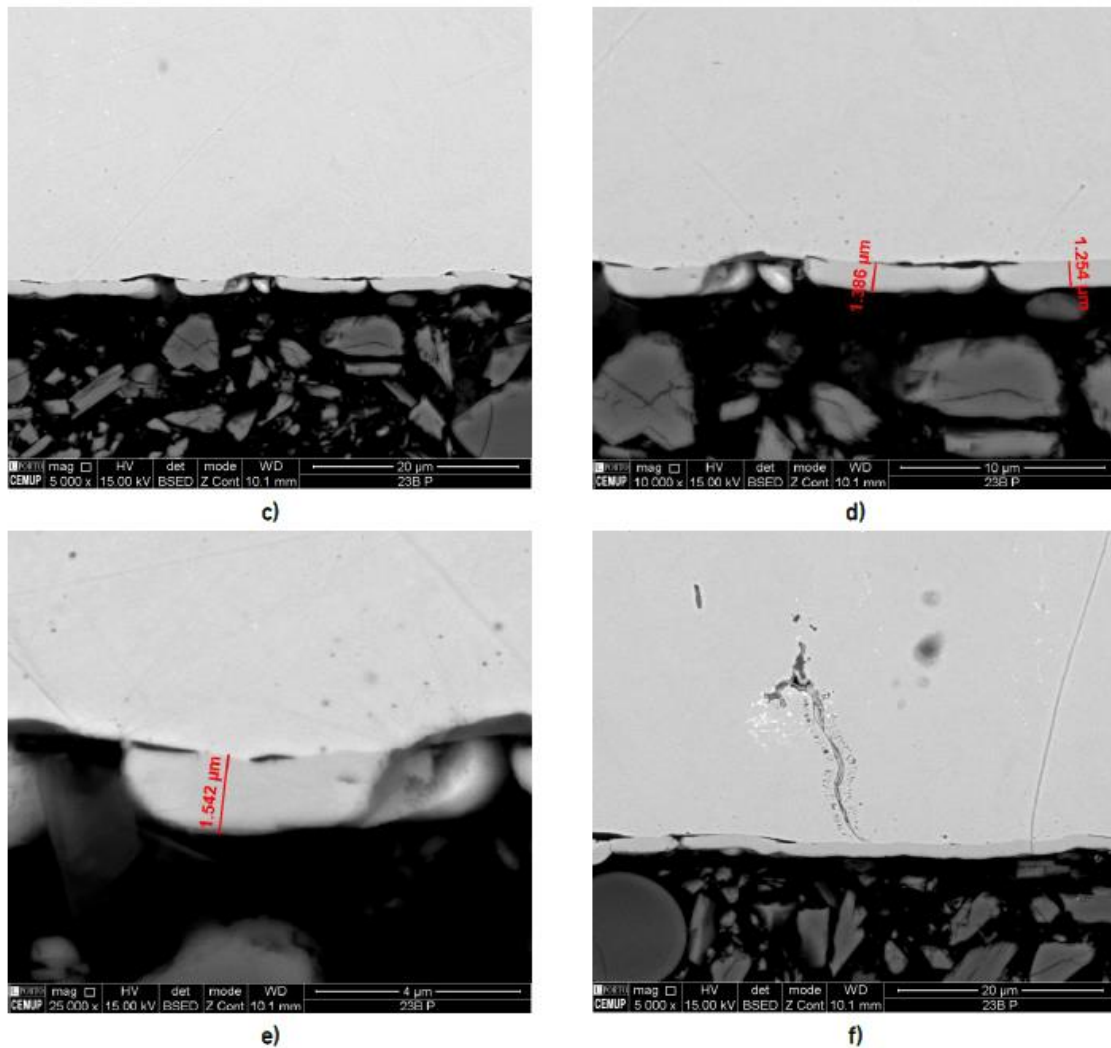


Figura 92 - Caracterização metalográfica (análise SEM) realizada à amostra 23B2: a) superfície de cravação; b) fissuração do material base e do revestimento na superfície de cravação; c) fragmentação do revestimento; d) espessura do revestimento na zona de fragmentação.

3.5.2.3 Determinação da dureza

Os resultados da medição da dureza (HV1) do material-base das amostras relativas às zonas funcionais das ferramentas de cravação nº 23A e 23B são apresentados na Figura 93.

Os valores determinados são da mesma ordem de grandeza nas amostras da ferramenta 23A (500.000 ciclos de utilização) e da 23B (30.000 ciclos), não havendo uma diferença significativa entre os resultados alcançados. A maior diferença relativa foi observada entre a dureza média das amostras 23A1 e 23B1, havendo uma diminuição de 2,4% no valor obtido para a amostra 23B1, comparativamente com o alcançado para a amostra 23A1.

Comparativamente com as durezas alcançadas para as amostras das ferramentas nº 17 (698 HV) e 20 (696 HV), ferramentas sujeitas a projeção de jato de areia para remoção da camada branca, sem ciclos de utilização, idênticas em geometria e produzidas com o mesmo material base (AISI S7), os resultados são também semelhantes, não parecendo haver alteração do valor da dureza na zona útil das ferramentas com a execução dos ciclos de utilização.

Medição	Amostra			
	23A1	23A2	23B1	23B2
1ª	725	701	693	713
2ª	715	698	696	705
3ª	706	706	705	693
Média	715	702	698	704
Desvio Padrão	9,50	4,04	6,24	10,07

Figura 93 - Resultados da medição das durezas (HV1) das amostras da ferramenta 23.

3.5.3 Conclusões – Caracterização de Ferramentas Sujeitas a Ciclos de Utilização

A Tabela 18 resume os resultados alcançados na caracterização de ferramentas sujeitas a um número distinto de ciclos de utilização, designadamente 500.000 e 30.000 ciclos. Para cada uma das ferramentas, foram analisadas duas amostras correspondentes a cada uma das superfícies de cravação (1 - “dente” grande e 2 - “dente” pequeno).

Tabela 18 - Quadro-resumo das características das ferramentas de cravação sujeitas a ciclos de utilização distintos.

Amostra nº	Fabricante	Nº ciclos cravação	Referência	Material	Revestimento crómio duro	Dureza material base [HV]
23 A1	R&B	500 000	DWB229063025.N	AISI S7	Residual	715
23 A2	R&B	500 000	DWB229063025.N	AISI S7	Fragmentado ($\approx 1,29 \mu\text{m}$)	702
23 B1	R&B	30 000	DWB229063025.N	AISI S7	Contínuo/ espessura reduzida ($\approx 130 \text{ nm}$)	698
23 B2	R&B	30 000	DWB229063025.N	AISI S7	Pouco fragmentado ($1,25 - 1,54 \mu\text{m}$)	704

Os resultados de espectrometria de emissão ótica revelaram a utilização de um aço AISI S7 (1.2355) na ferramenta nº 23 (23A e 23B).

Tal como expectável, dada a diferença no número de ciclos de utilização de ambas as ferramentas, os resultados da análise SEM-EDS demonstram que a ferramenta 23A (500.000 ciclos) apresenta maior desgaste superficial do que a ferramenta 23B (30.000 ciclos). Assim sendo, na superfície de cravação da ferramenta 23A, foi visível a existência de uma quantidade considerável de riscos e zonas de arrasto de material do revestimento de crómio. Adicionalmente, verificou-se a ocorrência de fissuração transversal da camada de revestimento nas áreas de maior desgaste (zonas de arrasto de material), observando-se, ainda, áreas em que o material base se encontra exposto.

Não obstante, na ferramenta 23B, embora globalmente exista uma reduzida quantidade de riscos e zonas de arrasto da camada de revestimento de crómio duro, visualizam-se também algumas zonas onde o material base já se encontra exposto.

Em todas as amostras analisadas, observou-se a presença de partículas de estanho depositadas na superfície da ferramenta de cravação, provenientes dos conectores cravados. Os resultados da medição da dureza (HV1) do material-base das amostras indicam valores semelhantes nas zonas funcionais das ferramentas de cravação nº 23A e 23B.

3.6 Discussão de resultados

3.6.1 Quantificação de melhorias

Após todas as caracterizações realizadas, é possível afirmar que existe de facto margem para melhorias da solução inicial, afirmação confirmada ainda pelo teste realizado num cliente da R&B.

Em termos da dureza da matéria-prima, constata-se que diferentes soluções possibilitam a obtenção de durezas semelhantes. Adicionalmente, o valor de dureza alcançado no aço depende, em grande parte, do tratamento térmico aplicado, nomeadamente das temperaturas de revenido utilizadas.

Relativamente às soluções de revestimentos superficiais examinadas, na ferramenta nº 1 (Ozturk), foi identificado um revestimento de crómio duro. Este apresentava uma espessura bastante reduzida (aproximadamente 1,0 µm), encontrando-se fragmentado após corte metalográfico, evidenciando-se falta de aderência ao substrato. Os ensaios de caracterização das ferramentas com revestimento de nitreto de titânio (TiN) demonstram que este revestimento alternativo deverá constituir uma solução bastante interessante no sentido de aumentar a dureza superficial e diminuir o desgaste das ferramentas, aumentando a durabilidade das mesmas. Na caracterização metalográfica, os resultados demonstraram uma boa adesão deste revestimento ao

substrato (ferramentas nº 4, 6, 7 e 9). Contudo, em algumas destas ferramentas, foi observada uma disparidade na espessura da camada de revestimento em diferentes zonas, havendo a necessidade de uma otimização e uniformização desta espessura. Devido à elevada ocupação dos clientes da R&B, de forma geral não foi possível testar as ferramentas de cravação com revestimento duro PVD de TiN, sendo este teste um dos trabalhos futuros. Na Figura 94 é possível comparar a uniformidade e adesão do revestimento em crómio duro da amostra 1 (Figura 94a) e o revestimento PVD de TiN (Figura 94b)).

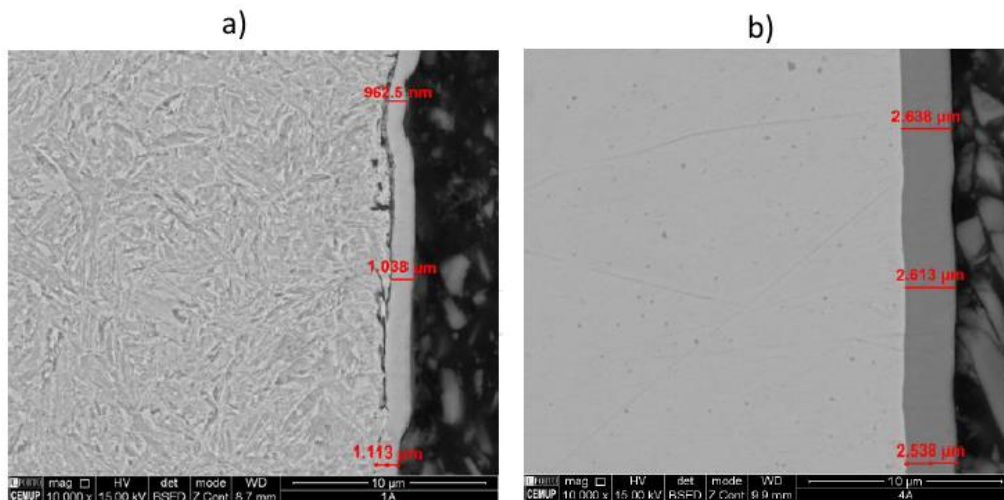


Figura 94 - Comparação da uniformidade da camada de revestimento por análise SEM: a) amostra nº 1 (crómio-duro; b) amostra nº 4 (revestimento de TiN por processo PVD).

Nas distintas análises SEM-EDS realizadas às amostras saídas diretamente de eletroerosão e às amostras submetidas a jato de areia, é possível verificar uma grande diferença no acabamento superficial das mesmas. As amostras saídas diretamente de eletroerosão apresentam uma camada de material fundido pouco uniforme (camada branca). Não obstante, na superfície de cravação das ferramentas nº 17, 18 e 20 provenientes de jato de areia, ainda se visualizam resíduos gerados pelo processo de eletroerosão de fio (presença de cobre e zinco), não havendo uma remoção efetiva da camada branca da zona funcional da ferramenta. Por este motivo, foi adotada uma operação extra, após a etapa de projeção de jato de areia, o polimento. Na Figura 95 é possível analisar lado a lado, a uniformidade da superfície de cravação da amostra nº18, após jato de areia (Figura 95a)), e da amostra nº19, saída diretamente de eletroerosão (Figura 95b)).

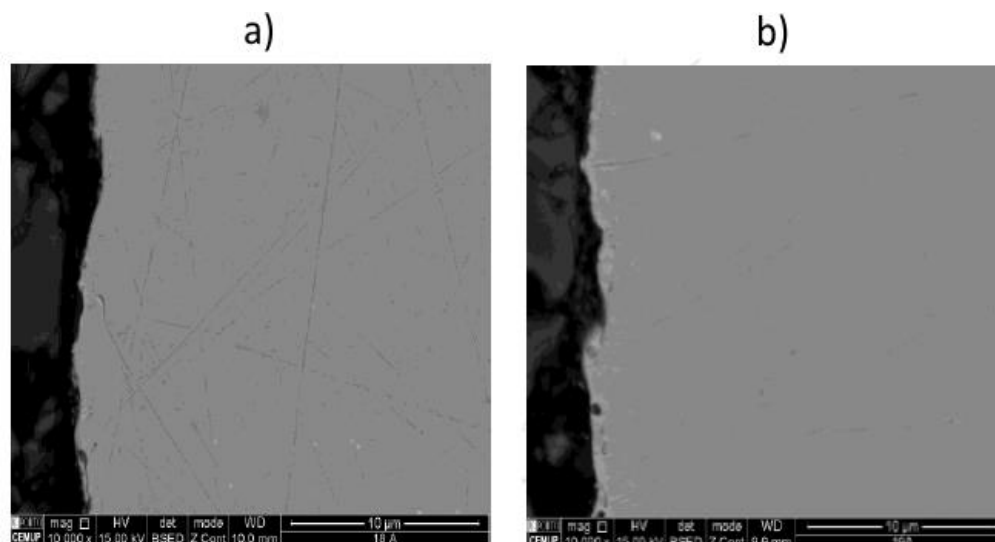


Figura 95 - Comparação da uniformidade da camada superficial lateral dos punções através de análise SEM: a) amostra nº18 (após jato de areia); b) amostra nº19 (saída de eletroerosão)

A amostra nº23, testada no cliente, já inclui a alteração de processo de fabrico indicada no subcapítulo 3.5.1 e conseguiu-se obter excelentes resultados, confirmando-se a elevada importância de uma remoção eficiente da camada branca proveniente da eletroerosão e a eficácia que o polimento oferece para esse processo. Note-se que o número de ciclos de cravação efetuados por um só punção, passou para mais do dobro do valor normalmente obtido pelas soluções anteriores (500 000 ciclos vs. 200 000 ciclos).

3.6.2 Proposta final adotada

A proposta final deste trabalho prático é a amostra nº 23, a qual já se encontra aplicada na R&B atualmente. Comparativamente com os punções de cravação que a Ricardo & Barbosa fabricava anteriormente, a nova solução apenas difere no acréscimo de uma etapa de polimento, após a operação de jato de areia. A necessidade de acrescentar esta nova operação é evidente nas amostras nº 17, 18 e 20, provenientes de jato de areia, dado que ainda se observa a presença de cobre e zinco, resíduos gerados pelo processo de erosão de fio. Devido à elevada taxa de ocupação do INEGI e da R&B, não foi possível realizar uma caracterização de uma amostra saída diretamente da nova operação de polimento, de modo a analisar os seus benefícios. Porém, o impacto positivo da adição desta etapa é verificável pelo excelente resultado obtido em testes num dos clientes da R&B. Apesar de uma melhoria superior a 100% em relação ao número de ciclos que se conseguiam anteriormente, existe ainda a forte possibilidade de se conseguir produzir um produto com maior durabilidade. Na análise SEM da amostra nº 23 é possível notar que a camada de revestimento de cromo-duro aplicada pela Ricardo & Barbosa não é tão uniforme como o desejável e possui uma espessura bastante reduzida em certas

zonas, havendo a necessidade de melhorias neste processo. Pretende-se ainda, num trabalho futuro, aliar à melhoria já obtida pela adição do processo de polimento, a utilização do revestimento de nitreto de titânio, dados os excelentes resultados obtidos na caracterização das amostras produzidas com o mesmo.

3.6.3 *Análise de custos*

Um dos principais objetivos desta dissertação é encontrar uma alternativa funcionalmente e economicamente viável às ferramentas que a R&B produz atualmente. Para determinar se uma ferramenta tem viabilidade económica, é necessário realizar uma análise de custos.

Em relação ao processo anterior, a nova solução adotada (amostra nº23) apenas difere no acréscimo de uma operação de polimento na sua gama operatória. Esta operação leva em média cerca de 1 minuto por cada punção. Considerando que a taxa horária da R&B para esta operação é de 40 €/hora e que esta taxa horária já inclui o custo do material utilizado no processo de polimento, é possível fazer a seguinte análise em relação ao preço de venda ao público (PVP) da referência DWB229063025.N (referência da amostra nº23):

- **PVP referência DWB229063025.N (processo atual)** – 14,21 €/unitário
- **PVP referência DWB229063025.N (nova proposta)** – 14,88 €/unitário

Pode-se concluir que o aumento do PVP desta referência é insignificante dados os resultados que se conseguiram obter com a nova proposta. Posto isto, uma vez que a nova solução proposta não altera em nada a geometria das ferramentas de cravação, um cliente que pretenda implementar a nova solução nas suas linhas de cravação de terminais elétricos terá apenas um aumento de cerca 4,5% no PVP da ferramenta, para um aumento superior a 100% na durabilidade da mesma. Na Tabela 19, é possível observar-se dois casos de estudo do retorno de investimento da nova solução proposta. Considere-se que o cliente 1 tem um consumo médio mensal de 2 000 ferramentas de cravação com o processo atual e que o cliente 2 faz uma média de 100 milhões de cravações por mês.

Tabela 19 - Análise do retorno de investimento para dois casos de estudo

Caso de estudo	Nº de ferramentas necessárias (processo atual)	Nº de ferramentas necessárias (nova solução)	Investimento mensal (processo atual)	Investimento mensal (nova solução)
Cliente 1	2 000	800	28 420 €	11 904 €
Cliente 2	500	200	7 105 €	2 976 €

Note-se que, para ambos os casos, com a utilização da nova solução o investimento mensal dos clientes é bastante inferior, face ao investimento necessário com o processo atual. Com a nova solução, ambos os clientes em estudo têm uma diminuição de 58,11% do seu investimento mensal.

Relativamente às diferentes alternativas de revestimento, é importante também analisar o impacto que a aplicação de um revestimento PVD de TiN poderá ter no custo final da peça. O revestimento atualmente utilizado, crómio-duro, é realizado internamente pela R&B, pelo que será bastante difícil competir com este a nível de preço. Considerando a referência 7116-6633XA (referência da amostra nº4), é possível fazer a seguinte análise:

- **PVP referência 7116-6633XA (crómio-duro)** – 14,21 €/unitário
- **PVP referência 7116-6633XA (revestimento TiN)** – 20,41 €/unitário

Neste caso, o aumento de preço já é notório, mas os resultados obtidos nos ensaios de caracterização demonstram que o revestimento PVD de TiN poderá justificar facilmente este aumento de preço. O revestimento de crómio-duro representa 1 € do PVP da ferramenta, enquanto o revestimento de TiN representa 7,20 €. No entanto, é importante referir que este preço do revestimento TiN só foi possível devido à R&B ser um parceiro de longa data do fornecedor que o realiza e ainda porque foi acordado o envio de lotes com pelo menos 50 unidades. Caso este acordo não fosse estabelecido, cada ferramenta 7116-6633XA com revestimento TiN custaria 40,42 €/unitário, sendo que 27,21 € deste valor seriam apenas devido ao revestimento.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Proposta de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

Esta dissertação permitiu tomar conhecimento da grande dimensão e do impacto que a indústria automóvel tem a nível global e nacional. A indústria automóvel é um setor extremamente competitivo e em constante evolução. A cravação de terminais elétricos ocupa um lugar de destaque nesta indústria, uma vez que os automóveis atuais possuem milhares de terminais elétricos, e com a crescente eletrificação do setor automóvel, estes números tendem a aumentar.

A execução de ensaios de caracterização avançada, como espectrometria de emissão ótica e microscopia eletrónica de varrimento (SEM/EDS), complementados com a realização de ensaios de dureza e de rugosidade superficial, revelou-se essencial na verificação da qualidade das ferramentas produzidas e na determinação das soluções alternativas testadas mais promissoras.



Relativamente às soluções de revestimentos superficiais, para além da cromagem a duro, usualmente aplicada pela R&B para aumentar o tempo de vida útil das suas ferramentas de cravação, foi também estudada a utilização de revestimentos duros de PVD (nitreto de titânio), no sentido de aumentar a dureza superficial e diminuir o desgaste das ferramentas, permitindo aumentar o número de ciclos de vida destas. Estes revestimentos foram caracterizados tendo em consideração a adesão ao substrato, a sua uniformidade e espessura. Concluiu-se que o uso de um o uso de um revestimento de nitreto de titânio (Balinit A), por parte da Ricardo & Barbosa, poderá constituir uma solução interessante no sentido de aumentar a dureza superficial e diminuir o desgaste das ferramentas, permitindo aumentar o número de ciclos de vida destas. Na caracterização metalográfica efetuada, estes revestimentos demonstraram uma boa adesão ao substrato.





Os resultados do segundo estudo desenvolvido, visando a caracterização de ferramentas em diferentes estágios do processo produtivo, demonstram que, embora as ferramentas provenientes de jato de areia apresentem uma superfície lateral com maior uniformidade, comparativamente com as saídas de eletroerosão, em algumas amostras ainda se verificam resíduos gerados pelo processo de erosão de fio (presença de cobre e zinco), pelo que não existe uma remoção efetiva da camada branca da zona funcional da ferramenta. Esta análise revelou-se essencial para se atingir a melhoria de processo implementada na solução final, a operação de polimento.

O estudo pormenorizado da superfície funcional de ferramentas de cravação com revestimentos de crómio duro, sujeitas a um número distinto de ciclos de utilização, através de ensaios de caracterização avançada, permitiu obter uma melhor compreensão da evolução do desgaste das ferramentas durante o seu tempo de vida útil.

Como forma de conclusão do trabalho, procedeu-se a um balanço em relação aos objetivos inicialmente propostos e resultados obtidos. Na Tabela 20 é possível fazer essa análise ao trabalho realizado.

Tabela 20 - Análise ao cumprimento dos objetivos propostos

Objetivo	Conclusões	Avaliação
Conseguir uma remoção eficaz da camada branca formada na operação de erosão de fio, eliminando todas as impurezas que poderão fragilizar o componente, e garantir que o acabamento final da zona funcional é o mais fino possível	Apesar de não se ter tido a possibilidade de analisar uma ferramenta de cravação produzida com a operação de polimento já implementada no seu processo de fabrico, as melhorias que esta operação trouxe à solução final é verificável pelos excelentes resultados obtidos em testes num dos clientes. No entanto, faz parte dos planos futuros realizar uma caracterização de uma amostra saída da operação de polimento.	
Garantir uma excelente adesão do revestimento ao substrato e uma camada uniforme do mesmo ao longo da zona funcional	As caracterizações das ferramentas de cravação com revestimento de nitreto de titânio demonstraram uma boa adesão ao substrato. Contudo, em algumas destas ferramentas, foi observada uma disparidade na espessura em diferentes zonas. A caracterização da solução final (amostra 23), revelou também que a camada de revestimento de crómio-duro aplicada pela Ricardo & Barbosa apresenta uma boa adesão, mas não é tão uniforme como o desejável e possui uma espessura bastante reduzida em certas zonas. No geral, o objetivo foi alcançado, principalmente com as amostras revestidas a TiN, mas este processo ainda terá de ser melhorado.	

<p>Encontrar revestimentos economicamente e funcionalmente fiáveis, que possam ser utilizados como alternativa ao crómio-duro</p>	<p>O revestimento PVD de nitreto de titânio revelou-se como uma solução interessante no sentido de aumentar a dureza superficial e diminuir o desgaste das ferramentas. O seu custo é mais elevado em relação ao revestimento de crómio-duro, mas as caracterizações realizadas demonstram que o seu preço mais elevado se deverá justificar. No entanto, é ainda necessário realizar testes práticos no cliente.</p>	
<p>Estudar possíveis alternativas aos materiais utilizados atualmente</p>	<p>Detetou-se que alguns dos concorrentes da R&B estão a utilizar matérias-primas bastante diferentes, mas que para diferentes soluções durezas semelhantes são obtidas. A informação reunida com estas análises permite à R&B explorar outros materiais alternativos no futuro.</p>	
<p>Confirmar que o tratamento térmico realizado é o mais adequado e que são obtidas as durezas finais desejadas</p>	<p>As determinações de dureza realizadas demonstram que as ferramentas de cravação produzidas pela R&B atingem as durezas desejáveis, sendo que as ferramentas fabricadas em AISI S7 atingem valores perto dos 700 HV e as ferramentas em AISI H13 atingem valores a rondar os 620 HV.</p>	
<p>Ultrapassar os 200 000 ciclos de cravação por punção</p>	<p>Este é o principal objetivo do trabalho e foi alcançado pela solução final proposta. O teste realizado num dos clientes alcançou 500 000 ciclos de cravação com um só punção.</p>	

Em suma, pode concluir-se que os objetivos definidos foram atingidos, apesar de que, para alguns dos pontos serão necessárias novas caracterizações e testes práticos nos clientes para validar de forma segura as novas soluções propostas. Pode-se afirmar que a nova solução proposta alcançou excelentes resultados no teste prático realizado e apresenta-se como uma excelente melhoria às ferramentas de cravação atualmente produzidas pela R&B.

4.2 Proposta de trabalhos futuros

A realização deste trabalho, permitiu encontrar uma nova solução ao processo atualmente utilizado pela Ricardo & Barbosa, a qual revelou um excelente desempenho nos testes realizados. No entanto, um maior número de testes e análises são necessários para validar de forma segura a nova solução e ainda existe margem para novas melhorias, como por exemplo a utilização do revestimento PVD à base de TiN. Deste modo, nesta secção serão apresentadas oportunidades de melhoria e trabalhos a realizar que podem ainda ser implementados nas ferramentas de cravação da Ricardo & Barbosa.

- Fabricar um maior número de ferramentas conforme a nova solução proposta e realizar novos testes práticos nos clientes da R&B.
- Realizar uma análise microscópica de uma amostra saída diretamente do polimento, de modo a assegurar realmente que todos os resíduos são removidos.
- Melhorar o processo de revestimento a crómio-duro, de forma a aumentar a espessura da camada de revestimento e a sua uniformidade. Isto poderá ser alcançado com um maior cuidado no processo e um maior tempo de deposição.
- Otimizar o processo de revestimento PVD, de modo a evitar camadas de revestimento não uniformes. Esta otimização deverá ser realizada em parceria com o fornecedor deste revestimento.
- Fabricar um maior número de ferramentas revestidas a PVD e sujeitá-las a ciclos de cravação num cliente.
- Fabricar e testar novas amostras nas matérias-primas alternativas identificadas neste trabalho.
- Aliar à melhoria já obtida pela adição do processo de polimento, a utilização do revestimento de nitreto de titânio.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Abdullah, O. I., Abbood, W. T., & Hussein, H. K. (2020). Development of Automated Liquid Filling System Based on the Interactive Design Approach. *FME Transactions*, 48(4). <https://doi.org/10.5937/fme2004938A>
- ACAP. (2022). *Veículos Automóveis Produzidos em Portugal - Resumo por Fábricas Anos: 2021 e 2020*. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: https://www.acap.pt/site/uploads/paginas/documentos/81FDCB76-F96A0_1.pdf.
- AFIA. (2018). *Exportações de componentes para automóvel atingem valor recorde*. [acedido em dezembro de 2021]; Disponível em: <https://afia.pt/exportacoes-de-componentes-para-automovel-atingem-valor-recorde/>.
- AFIA. (2020). *Evolução Histórica*. [acedido em dezembro de 2021]; Disponível em: <https://afia.pt/a-afia/evolucao-historica/>.
- AFIA. (2021). *Indústria de Componentes para Automóveis - Estatísticas 2020*. [acedido em dezembro de 2021]; Disponível em: https://afia.pt/wp-content/uploads/2020/03/AFIA_indcompautomoveis.pdf.
- AIAG. (2006). *PPAP Production Part Approval Process (PPAP) Manual, 4th Edition*.
- AICEP. (2014). *Portugal Global*, 67. [acedido em dezembro de 2021]; Disponível em: <http://www.revista.portugalglobal.pt/AICEP/PortugalGlobal/Revista67/>.
- Andjelkovic, A. (2017). Implementation of Just-in-sequence concept in automotive industry: Comparison of Austrian and Serbian model. *Industrija*, 45(3). <https://doi.org/10.5937/industrija45-14466>
- Antonetti, E., Schneider, E. L., Homem, C. F., Diehl, D., Scienza, L. C., Kunst, S. R., Morisso, F. D. P., & Oliveira, C. T. (2021). Análise dos processos de Cromagem, Niquelagem, Zincagem e Estanhagem / Analysis of the processes of chromium plating, nickel plating, zinc plating and tin plating. *Brazilian Journal of Development*, 7(10). <https://doi.org/10.34117/bjdv7n10-136>
- APCER. (2022). *IATF 16949:2016 - Sistema de Gestão da Qualidade para Organizações da Indústria Automóvel*. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: <https://www.apcergroup.com/pt/certificacao/pesquisa-de-normas/136/iatf-16949-2016>.
- Araújo, W. F. S., Silva, F. J. G., Campilho, R. D. S. G., & Matos, J. A. (2017). Manufacturing cushions and suspension mats for vehicle seats: a novel cell

- concept. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(5–8).
<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9475-6>
- Awale, A., & Inamdar, K. (2020). Multi-objective optimization of high-speed turning parameters for hardened AISI S7 tool steel using grey relational analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(7).
<https://doi.org/10.1007/s40430-020-02433-z>
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018). Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. In *Coatings* (Vol. 8, Issue 11).
<https://doi.org/10.3390/COATINGS8110402>
- Barbosa, A. F. G., Campilho, R. D. S. G., Silva, F. J. G., Sánchez-Arce, I. J., Prakash, C., & Buddhi, D. (2022). *Design of a Spiral Double-Cutting Machine for an Automotive Bowden Cable Assembly Line*. 10, 811.
<https://doi.org/10.3390/machines10090811>
- BBN. (2022). CSN 41 9569. [acedido em julho de 2022]; Disponível em: <https://www.steelestores.com/grade/csn-19569-csn-41-9569.html>.
- Bohler. (2013). *Bohler-Uddeholm S7 Mold Quality*.
- CableCraft. (2019). *A Comprehensive Guide To Good Crimping Practice. CableCraft Guide*.
- Cao, J., Mukherjee, A., & Sinha, U. B. (2018). Firm-asymmetry and strategic outsourcing. *International Review of Economics and Finance*, 53.
<https://doi.org/10.1016/j.iref.2017.10.008>
- CasaDoAutoElétrico. (2022). *Terminal de Encaixe Fêmea*. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: https://casadoautoeletrico.com.br/terminal_encaixe_femea.
- Castro, T. A. M., Silva, F. J. G., & Campilho, R. D. S. G. (2017). Optimising a Specific Tool for Electrical Terminals Crimping Process. *Procedia Manufacturing*, 11.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.274>
- Chakravarty, A. K., & Balakrishnan, N. (2001). Achieving product variety through optimal choice of module variations. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 33(7). <https://doi.org/10.1080/07408170108936856>
- Chiaverini, V. (2002). *Chiaverini, V.; Aços e Ferros Fundidos – 7ª edição”, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2002*.
- CNI. (2022). ČSN 41 9312. [acedido em julho de 2022]; Disponível em: <https://nahledy.normy.biz/n.php?i=3497>.

- COM. (2019). *ANEXOS do Documento de Reflexão Para uma Europa sustentável até 2030 [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0022&from=PT>*.
- Corporation, D. H. (2012). *Manual da Qualidade e Desenvolvimento de Fornecedores*.
- Costa, M. J. R., Gouveia, R. M., Silva, F. J. G., & Campilho, R. D. S. G. (2018). How to solve quality problems by advanced fully-automated manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9–12). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0158-8>
- Costa, R. J. S., Silva, F. J. G., & Campilho, R. D. S. G. (2017). A novel concept of agile assembly machine for sets applied in the automotive industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(9–12). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0109-4>
- de Treville, S., Shapiro, R. D., & Hameri, A. P. (2004). From supply chain to demand chain: The role of lead time reduction in improving demand chain performance. *Journal of Operations Management*, 21(6). <https://doi.org/10.1016/j.jom.2003.10.001>
- Decher, G., & Schlenoff, J. B. (2012). Multilayer Thin Films: Sequential Assembly of Nanocomposite Materials: Second Edition. In *Multilayer Thin Films: Sequential Assembly of Nanocomposite Materials: Second Edition* (Vols. 1–2). <https://doi.org/10.1002/9783527646746>
- Drucker, P. F. (1946). Peter F. Drucker: Concept of the Corporation. (New York: The John Day Company, 1946.). *The Review of Politics*, 8(4). <https://doi.org/10.1017/s0034670500045186>
- Fernandes, L., Silva, F. J. G., Andrade, M. F., Alexandre, R., Baptista, A. P. M., & Rodrigues, C. (2017). Increasing the stamping tools lifespan by using Mo and B4C PVD coatings. *Surface and Coatings Technology*, 325, 107–119. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2017.06.043>
- Fisher, M. L., & Ittner, C. D. (1999). Impact of product variety on automobile assembly operations: empirical evidence and simulation analysis. *Management Science*, 45(6). <https://doi.org/10.1287/mnsc.45.6.771>
- Fox-Rabinovich, G., Paiva, J. M., Gershman, I., Aramesh, M., Cavelli, D., Yamamoto, K., Dosbaeva, G., & Veldhuis, S. (2016). Control of self-organized criticality through adaptive behavior of nano-structured thin film coatings. *Entropy*, 18(8). <https://doi.org/10.3390/e18080290>
- Gouveia, R. M., Silva, F. J. G., Reis, P., & Baptista, A. P. M. (2016). Machining duplex stainless steel: Comparative study regarding end mill coated tools. *Coatings*, 6(4). <https://doi.org/10.3351/coatings6040051>

- GRANTA. (2020). *GRANTA EduPack® 2020*.
- Graphite. (2017). *Graphite-Technologies* [acedido em junho de 2022]; Disponível em: http://graphite-technologies.com/download/gt.2017.01.a_Polimento.pdf.
- Hatzichronoglou, T. (1997). Revision of the High-Technology Sector and Product Classification. *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*, 1997/02.
- Hoche, H., Groß, S., & Oechsner, M. (2014). Development of new PVD coatings for magnesium alloys with improved corrosion properties. *Surface and Coatings Technology*, 259(PA), 102–108. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2014.04.038>
- Holmberg, K., Ronkainen, H., & Matthews, A. (2000). Tribology of thin coatings. In *Ceramics International* (Vol. 26, Issue 7). [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00015-8](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00015-8)
- Hudson. (2022). *Hudson Tool Steel Corporation* [acedido em junho de 2022]; Disponível em: <https://hudsontoolsteel.com/technical-data/steelA2>.
- IAPMEI. (2014). *Estratégia Nacional de Investigação e Inovação para uma Especialização Inteligente EI&I 2014-2020*. Lisboa: IAPMEI.
- INEGI. (2022). *INEGI* [acedido em junho de 2022]; <https://www.inegi.pt/pt/sobre-o-inegi/o-inegi/>.
- INTELI. (2005). *Diagnóstico da Indústria Automóvel em Portugal*. Ministério da Economia e Inovação, Inteli.
- IPQ. (2022). *Normalização*. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: <http://www1.ipq.pt/PT/Normalizacao/Pages/Normalizacao.aspx>.
- ISO 9000:2015. (2015). *Sistemas de gestão da qualidade Fundamentos e vocabulário (ISO 9000:2015)*.
- Javid, N., Khalili-Damghani, K., Makui, A., & Abdi, F. (2020). Multi-objective flexibility-complexity trade-off problem in batch production systems using fuzzy goal programming. *Expert Systems with Applications*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113266>
- Jongwuttanaruk, K., & Thavornwat, C. (2022). Optimization of Mechanical Crimping in the Terminal Crimping Process Using a Response Surface Methodology. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6508289>
- Korhonen, H., Syväluoto, A., Leskinen, J. T. T., & Lappalainen, R. (2018). Optically transparent and durable Al₂O₃ coatings for harsh environments by ultra short pulsed laser deposition. *Optics & Laser Technology*, 98, 373–384. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2017.07.050>

- Lancaster, K. (1990). The Economics of Product Variety: A Survey. *Marketing Science*, 9(3). <https://doi.org/10.1287/mksc.9.3.189>
- Lin, W., Morita, S. Y., Uehara, Y., & Ohmori, H. (2008). Development of X-ray mirrors manufacturing process with ELID-grinding and polishing methods. *International Journal of Abrasive Technology*, 1(3–4). <https://doi.org/10.1504/IJAT.2008.020562>
- Ling, F. F. (2006). Mechanical Engineering Series. In *Control*.
- Maawad, E., Brokmeier, H. G., & Wagner, L. (2010). Texture gradients in shot peened Ti-2.5Cu. *Solid State Phenomena*, 160. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.160.141>
- Maná e.d.i. (2012). *Linha de montagem Ford T - Aventuras na história*. [acedido em dezembro de 2021]; Disponível em: <http://cargocollective.com/manaedi/Linha-de-montagem-Ford-T-Aventuras-na-historia>.
- Marketresearch, P. (2021). *Top Automobile Wire Harness Manufacturers 2021*. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: <https://pmarketresearch.com/top-automobile-wire-harness-manufacturers-2021/>.
- Martin, P. M. (2010). Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. In *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings*.
- Mattox, D. M. (2003). The Foundations of Vacuum Coating Technology. In *The Foundations of Vacuum Coating Technology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-10329-6>
- Mattox, D. M. M. (1998). HANDBOOK OF PHYSICAL VAPOR DEPOSITION (PVD) PROCESSING Film Formation , Adhesion , Surface Preparation and Contamination Control. In *Measurement*.
- Michalos, G., Makris, S., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2010). Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach. In *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (Vol. 2, Issue 2). <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2009.12.001>
- Nagorny, K., Colombo, A. W., & Schmidtman, U. (2012). A service- and multi-agent-oriented manufacturing automation architecture: An IEC 62264 level 2 compliant implementation. *Computers in Industry*, 63(8). <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.08.003>
- Ngan, C. C., & Tam, H. Y. (2004). A non-contact technique for the on-site inspection of molds and dies polishing. *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156(1–3). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.263>

- Nunes, V., Silva, F. J. G., Andrade, M. F., Alexandre, R., & Baptista, A. P. M. (2017). Increasing the lifespan of high-pressure die cast molds subjected to severe wear. *Surface and Coatings Technology*, 332, 319–331. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2017.05.098>
- Oerlikon. (2022). *Oerlikon Balzers [acedido em junho de 2022]; Disponível em: <https://www.oerlikon.com/balzers/br/br/portfolio/tecnologias-de-superficie/processos-a-base-de-pvd/>*.
- OICA. (2020). *2020 Production Statistics. [acedido em dezembro de 2021]; Disponível em: <https://www.oica.net/category/production-statistics/2020-statistics/>*.
- Pannoni, F. D. (2010). *Pannoni, F.D.; Aços Estruturais; Blucher*.
- Pfefferkorn, F. E., Duffie, N. A., Morrow, J. D., & Wang, Q. (2014). Effect of beam diameter on pulsed laser polishing of S7 tool steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63(1). <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.055>
- Pinto, G., Silva, F. J. G., Porteiro, J., Míguez, J. L., Baptista, A., & Fernandes, L. (2018). A critical review on the numerical simulation related to Physical Vapour Deposition. *Procedia Manufacturing*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.138>
- Ponnanna, A. A., Joshi, S. M., Bhat, S., & Shetty, P. (2001). Evaluation of the polished surface characteristic of cobalt-chrome castings subsequent to various finishing and polishing techniques. In *Indian journal of dental research : official publication of Indian Society for Dental Research* (Vol. 12, Issue 4).
- Pop, L. D., & Elod, N. (2015). Improving Product Quality by Implementing ISO / TS 16949. *Procedia Technology*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.02.143>
- Rajak, A. K., & Kore, S. D. (2018). Application of electromagnetic forming in terminal crimping using different types of field shapers. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(9). <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0827-z>
- Rajak, D. K., Kumar, A., Behera, A., & Menezes, P. L. (2021). Diamond-like carbon (Dlc) coatings: Classification, properties, and applications. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/app11104445>
- R&B. (2022). *Ricardo & Barbosa Lda. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: <https://www.ricardo-barbosa.com/pt/>*.
- Ribeiro, L., & Barata, J. (2011). Re-thinking diagnosis for future automation systems: An analysis of current diagnostic practices and their applicability in emerging IT based production paradigms. In *Computers in Industry* (Vol. 62, Issue 7). <https://doi.org/10.1016/j.compind.2011.03.001>

- RIC. (2010). *Global and China Automotive Wiring Harness Industry Report, 2009-2010*. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: <http://www.researchinchina.com/Report/ReportInfo.aspx?id=5867>.
- Rodrigues, H., Silva, F. J. G., Morgado, L. G., Sá, J. C., Ferreira, L. P., & Campilho, R. D. S. G. (2020). A novel computer application for scrap reporting and data management in the manufacturing of components for the automotive industry. *Procedia Manufacturing*, 51, 1319–1326. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.184>
- Saklakoglu, N., Bolouri, A., Irizalp, S. G., Baris, F., & Elmas, A. (2021). Effects of shot peening and artificial surface defects on fatigue properties of 50CrV4 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(9–10). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06532-y>
- Seel Grades. (2022). *55NiCr12* [acedido em julho de 2022]; Disponível em: <https://www.steel-grades.com/Steel-Grades/Tool-Steel-Hard-Alloy/S5NiCr12.html>.
- Selada, C., Felizardo, J. R., & Heitor, M. (2004). *Da produção à concepção: meio século de história automóvel em Portugal*, in: Heitor, M., Rollo, F. e Brito, J.M. (Eds.), *Momentos de Inovação e Engenharia em Portugal no século XX*, Lisboa: Dom Quixote.
- Silva, A. (2009). *Redes de comunicações no automóvel - Sistemas Automóveis, Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores*.
- Silva, F. J. G. (2001). *Estudo da Estrutura e Comportamento Tribológico de Revestimentos Duros e Ultra-Duros Executados no Vácuo. Tese de Doutoramento, FEUP, Porto, Portugal, 2001*.
- Silva, F. J. G., Casais, R. C. B., Martinho, R. P., & Baptista, A. P. M. (2012). Mechanical and tribological characterization of TiB₂ thin films. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12(12). <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6759>
- Silva, F. J. G., Morgado, L., Teixeira, A., Sá, J. C., Ferreira, L. P., & de Almeida, F. (2020). Analysis and development of a failure prediction model for electrical terminals used in the automotive industry. *Procedia Manufacturing*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.030>
- Silva, F., Martinho, R., Andrade, M., Baptista, A., & Alexandre, R. (2017). Improving the wear resistance of moulds for the injection of glass fibre-reinforced plastics using PVD coatings: A comparative study. *Coatings*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/coatings7020028>
- Soares. (2005). *Soares, P.; Aços – Características e Tratamentos – 5ª Edição, 2005*.

- Soares, M. (2016). Desenvolvimento de sistemas automáticos de alimentação e descarga de injetora de plásticos. *Revista de Ciência Elementar*, 4(1).
- Sousa, V. F. C., Silva, F. J. G. da, Campilho, R. D. S. G., Pinto, A. G., Ferreira, L. P., & Martins, N. (2022). Developing a Novel Fully Automated Concept to Produce Bowden Cables for the Automotive Industry. *Machines*, 10(5), 290. <https://doi.org/10.3390/machines10050290>
- Sumitomo, W. S. (2018). *Sumitomo Wiring Systems History*. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: <https://www.sws.co.jp/en/corporation/outline/history.html>.
- Tamada, S., Chandra, M., Patra, P., Mandol, S., Bhattacharjee, D., & Dan, P. K. (2020). Modeling for design simplification and power-flow efficiency improvement in an automotive planetary gearbox: A case example. *FME Transactions*, 48(3). <https://doi.org/10.5937/fme2003707T>
- TE. (2019). *INTRODUCTION TO TOOLING SOLUTIONS*. TE Connectivity.
- TE. (2022a). *Automotive Connectors for Harsh and Exterior Applications*. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: <https://www.te.com/usa-en/products/connectors/automotive-connectors/intersection/mcon.html?tab=pgp-story>.
- TE. (2022b). *Crimp Applicators*. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: <https://www.te.com/usa-en/products/application-tooling/applicators.html?tab=pgp-story>.
- Thonemann, U. W., & Bradley, J. R. (2002). The effect of product variety on supply-chain performance. *European Journal of Operational Research*, 143(3). [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00343-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00343-5)
- Trommnau, J., Kühnle, J., Siegert, J., Inderka, R., & Bauernhansl, T. (2019). Overview of the state of the art in the production process of automotive wire harnesses, current research and future trends. *Procedia CIRP*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.067>
- Vale, A., Costa, D., Monteiro, G., Ferreira, J. P., Santos, M., & Ribeiro, P. (2013). *A Indústria Automóvel em Portugal*.
- van Doan, T., Kusmič, D., Pospíchal, M., Tran, Q. D., & Nguyen, V. T. (2017). Friction and Wear Behaviour of 42CrMo4 Steel Treated by Tenifer, Hard Chrome and Plasma Nitriding Technologies. *Manufacturing Technology*, 17(2). <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/2/168>
- Veloso, F., Henry, C., Roth, R., & Clark, J. P. (2000). *Global Strategies for the development of the Portuguese Autoparts Industry*. Lisboa. IAPMEI.

- Vieira, A. (2020). *Projeto de Microinjetora de Termoplásticos para a Indústria Automóvel - Tese de Mestrado*.
- Womack, J. P., Roos, D., & Jones, D. T. (1990). The Machine That Changed the World: The Massachusetts Institute of Technology 5-Million-Dollar, 5-Year Report on the Future of the Automobile Industry. In *Rawson Associates, New York, NY*.
- Yang, S., Zeng, W., & Yang, J. (2020). Characterization of shot peening properties and modelling on the fatigue performance of 304 austenitic stainless steel. *International Journal of Fatigue*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105621>
- Yazaki. (2019). *Yazaki North America - Fully Connected*. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: <https://twitter.com/yazakina/status/1083047014424825856?lang=fi>.
- Yazaki. (2021a). *Annual Report*. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: <https://www.yazaki-group.com/global/about/ar.html>.
- Yazaki. (2021b). *Introduction of Yazaki Group History From Foundation Through Now*. [acedido em janeiro de 2022]; Disponível em: <https://www.yazaki-group.com/global/about/history.html>.

ANEXOS

6.1 Anexo 1 - Composições Químicas Normalizadas dos Aços

6 ANEXOS

6.1 Anexo 1 - Composições Químicas Normalizadas dos Aços

Referência	Composição Química em %wt										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
CSN 41 9569	0.58	0.70	0.25			4.5	0.8		0.20		Bal.
	-	-	-	≤	≤	-	-	-	-	≤ 0.60	
	0.68	1.10	0.55	0.030	0.0350	5.5	1.2		0.40		

Figura 96 - Composição química normalizada do aço CSN 41 9569 (BBN, 2022)

Referência	Composição Química em %wt										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
CSN 41 9312	0.75	0.15	1.85			≤ 0.25			0.10		Bal.
	-	-	-	≤	≤	-	-	≤ 0.35	-	-	
	0.85	0.35	2.15	0.030	0.0350				0.20		

Figura 97 - Composição química normalizada do aço CSN 41 9312 (CNI, 2022)

Referência	Composição Química em %wt										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W	Fe	
AISI S7 ISO 50CrMoV13-15	0.45	0.2	0.2			3	1.3	0		91.9	
	-	-	-	≤ 0.030	≤ 0.030	-	-	-	-	-	
	0.55	1	0.9			3.5	1.8	0.35		94.9	

Figura 98 - Composição química normalizada do aço AISI S7 (GRANTA, 2020)

Referência	Composição Química em %wt										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Fe	
AISI H13 ISO X40CrMoV5-1	0.32	0.8	0.2			4.75	1.1		0.8	88.9	
	-	-	-	≤ 0.030	≤ 0.030	-	-	≤ 0.30	-	-	
	0.45	1.25	0.6			5.5	1.75		1.2	92	

Figura 99 - Composição química normalizada do aço AISI H13 (GRANTA, 2020)

Referência	Composição Química em %wt										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Fe	
AISI 420 EN X30Cr13	0.26					12 - 14				82,6	
	-	0 - 1	0 - 1	≤ 0.04	≤ 0.03	-	-	0 - 1	-	-	
	0.35									87,7	

Figura 100 - Composição química normalizada do aço AISI 420 (GRANTA, 2020)

Referência	Composição Química em %wt									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Fe
UNE 55NiCr12	0.50 -	0.10 -	0.35 -	≤ 0.025	≤ 0.020	0.90 -	-	2.80 -	-	Bal.
	0.60	0.40	0.65			1.20		3.20		

Figura 101 - Composição química normalizada do aço UNE 55NiCr12 (Seel Grades, 2022)

Referência	Composição Química em %wt									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Fe
AISI A2	0.95 -	0.1 -	0.4 -	≤ 0.03	≤ 0.03	4.75 -	0.9 -	≤ 0.3	0.15 -	89.7 -
ISO X100CrMoV5	1.05	0.5	1			5.5	1.4		0.5	92.8

Figura 102 - Composição química normalizada do aço AISI A2 (GRANTA, 2020)

Referência	Composição Química em %wt									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Fe
AISI 5150	0.48 -	0.15 -	0.7 -	≤ 0.035	≤ 0.04	0.7 -	-	-	-	97.2 -
	0.53	0.35	0.9			0.9				98

Figura 103 - Composição química normalizada do aço AISI 5150 (GRANTA, 2020)

Referência	Composição Química em %wt									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Fe
AISI D2	1.4 -	≤ 0.6	≤ 0.6	≤ 0.03	≤ 0.03	11 -	0.7 -	≤ 0.3	0.5 -	81.6 -
ISO X153CrMoV12	1.6					13	1.2		1.1	86.9

Figura 104 - Composição química normalizada do aço AISI D2 (GRANTA, 2020)