

Estudo de revestimentos do disco de serras circulares para corte de madeira

Mariana Inês Moura Costa

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre
em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Fernando Jorge Lino Alves

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Porto, Julho de 2015

“A persistência é o menor caminho do êxito.” (Charles Chaplin)

Resumo

As serras circulares são as ferramentas de corte mais utilizadas para o corte de madeira, pelo que a proteção das suas superfícies tem sido objeto de preocupação por parte da indústria. Daí resultou o desenvolvimento de estudos aprofundados, visando melhorar as características daquelas superfícies através de diferentes tipos de acabamentos. Neste sentido, o presente trabalho incidiu no estudo de revestimentos do disco de serras circulares de diferentes fabricantes, incluindo ensaios de caracterização mecânica, como medição de dureza e ensaio de desgaste por esfera rotativa (*ball-cratering test*), análise morfológica, medição de espessura do revestimento, entre outros.

O estudo, composto por três partes, teve como ponto de partida uma análise comparativa do aço e do revestimento utilizado numa serra circular FREZITE (Portugal) e de outro fabricante.

A segunda parte experimental consistiu em executar um revestimento que: eliminasse o processo de decapagem com jato de areia como recobrimento da zona termicamente afetada; evitasse a oxidação da superfície da serra quando manuseada; e aumentasse a resistência ao desgaste. Em seguida, procedeu-se à análise do respetivo revestimento.

Por fim, noutra conjunto de serras, chamadas serras finas, o objetivo consistiu em analisar o revestimento do disco, bem como avaliar os parâmetros que influenciam a aderência da madeira ao disco da serra durante o processo de corte, de maneira a melhorá-los nas serras FREZITE e assim reproduzir uma serra com melhor qualidade superficial.

Os resultados mostraram que um revestimento metálico em cromo pode ser utilizado para proteger o disco de serras circulares, aumentando a resistência ao desgaste, sendo também uma alternativa à decapagem com jato de areia.

No que respeita às serras finas, conseguindo uma rugosidade superficial menor do disco prevê-se a possibilidade de minimizar a aderência de resíduos provenientes do corte de madeira.

Abstract

Circular saws are cutting tools commonly used for cutting wood, so the protection of its surfaces has been a matter of concern for the industry. This resulted in the development of in-depth studies in order to improve the characteristics of those surfaces through different types of finishes. In this regard, this work focuses on the study of coatings disc of circular saws of different manufacturers, including mechanical characterization tests, such as measurement of hardness and wear test by ball-cratering test, morphological analysis, thickness measurement coating, among others.

This study consists of three parts, it starts with a comparative analysis of steel and coating used on a circular saw FREZITE (Portugal) and another fabricant.

The second experimental part comprises in the execution of a coating that would eliminate the process by sand blasting, through covering the heat affected zone, preventing the oxidation of the surface of the saw when handled, and increased wear resistance. Afterwards the respective finish is analyzed.

Finally, on another set of blades called thin saws, the goal was to analyze the disc coating, and to assess the parameters that influence the adherence of the wood to the saw blade during the process of cut, in order to improve them in FREZITE saws and therefore manufacture a saw with better surface quality.

The results show that a metallic chromium coating can be used to protect the disc of circular saws, increasing resistance to wear, also being an alternative to sand blasting jet.

In regards to thin disc saws it was achieved a low surface roughness, minimizing the waste timber from cutting wood.

Keywords

Coating, circular saw, metallic chromium coating, protection surfaces

Agradecimentos

A realização desta Dissertação só foi possível com o apoio e contributo de várias pessoas e instituições, às quais gostaria de expressar o meu reconhecimento e gratidão.

Agradeço, em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Lino, pela disponibilidade e prontidão demonstrada no fornecimento de material de trabalho, bem como pelo conhecimento e apoio que me dispensou.

À FREZITE- Ferramentas de Corte S.A.- e ao Eng. Fernando Figueiredo pelo fornecimento das serras circulares alvo de estudo e pelo papel importante como impulsionador da investigação realizada.

Ao Eng. Pedro Paiva, da FREZITE, quero expressar o meu sincero agradecimento, pelo apoio fulcral durante a realização da parte experimental desta Dissertação, disponibilizando-se desde início para qualquer esclarecimento.

Ao INEGI, nomeadamente à D. Armanda, do Laboratório de Materialografia, pela prontidão, profissionalismo e apoio prestado na realização dos ensaios laboratoriais.

Ao CEMUP, em particular ao Dr. Carlos Sá, pela colaboração e empenho na análise por microscopia eletrónica de varrimento.

Ao laboratório de Tribologia, Vibrações e Manutenção Industrial- CETRIB- do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP pela disponibilidade e ajuda dispensada, em particular ao Professor Ramiro Martins e ao Professor José Brandão.

Ao Prof. Monteiro Batista, pelo material de apoio fornecido, bem como por ter tornado possível a realização dos ensaios de desgaste por esfera rotativa.

À Prof^a. Teresa e Eng. Miguel Figueiredo pelo fornecimento de material de apoio à realização desta Dissertação e pelos conhecimentos científicos transmitidos.

À D. Emília e ao Sr. Fernando pela ajuda e disponibilidade demonstrada.

Aos meus amigos, em especial à Ana Dulce, Joana Varajão e Sofia Abreu, pelo incentivo, carinho e apoio demonstrado, mesmo nos momentos mais difíceis.

Por fim, agradeço à minha família, pela paciência, incentivo e motivação demonstrada em todos os momentos.

Índice de Conteúdos

1. Introdução	1
1.1. A FREZITE.....	2
1.2. A madeira.....	3
1.3. Problemática do corte de madeira	3
2. Processo de corte com serras circulares	5
2.1. Caraterísticas e Especificações.....	6
2.1.1. Materiais das pastilhas de corte	8
2.2. Classificação das serras circulares	9
2.3. Parâmetros de corte	11
2.3.1. Velocidade de corte	11
2.3.2. Velocidade de Avanço.....	13
2.4. Material das Serras Circulares	14
2.4.1. Aços ao carbono para ferramentas.....	15
2.5. Processo produtivo de serra circular	16
2.6. Durabilidade das serras circulares.....	16
2.6.1. Mecanismos de Desgaste.....	17
2.7. Sobreaquecimento do disco durante o corte.....	19
3. Revestimento do disco de serras circulares.....	21
3.1. Aplicação de revestimentos.....	22
3.2. Revestimentos Metálicos	23
3.2.1. Cromo Duro.....	24
3.2.1.1. Eletrodeposição de Cromo Duro	26
3.2.2. Cromo Duro Localizado	29
3.2.3. Variação da espessura de Cromo Duro.....	29
3.2.4. Custo.....	29
3.2.5. Equipamento.....	30
3.2.6. Deposição Química	31
3.2.6.1. Níquel Químico	32
3.3. Revestimentos de conversão	38
4. Técnicas de caraterização estrutural de revestimentos	43
4.1. Caraterização das superfícies	44

4.1.3.	A importância dos estados de superfície.....	46
4.1.4.	Parâmetros caracterizadores do estado da superfície (rugosidade).....	46
4.2.	Espessura do revestimento.....	48
4.3.	Análise das propriedades mecânicas.....	50
4.3.1.	Dureza.....	50
4.3.1.1.	Ensaio Vickers.....	50
4.3.2.	Ensaio de Microdureza.....	51
4.3.4.	Adesão do revestimento ao substrato.....	53
4.3.4.1.	Indentação deslizante- <i>Scratch-Test</i>	54
4.3.4.2.	Verificação da adesão do revestimento ao substrato através de teste de indentação Rockwell.....	55
4.4.	Estudo do Comportamento tribológico.....	56
4.4.1.	Ensaio de desgaste por esfera rotativa (<i>ball-cratering test</i>).....	57
4.5.	Ensaio de corrosão.....	58
4.5.1.1.	Ensaio de perda de massa.....	59
4.6.	Análise Morfológica.....	59
4.6.1.	Microscopia Eletrônica de Varrimento (MEV / SEM).....	59
4.7.	Análise da Composição Química.....	60
4.7.1.	Ensaio de análise quantitativa por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	60
5.	Técnicas Experimentais.....	63
5.1.	Caraterização metalográfica.....	63
5.2.	Análise da morfologia e composição química do revestimento.....	64
5.2.1.	Microscopia eletrônica de varrimento (MEV/SEM) e Espectroscopia por Dispersão de Raios-X (EDS).....	64
5.2.2.	Espectroscopia de Emissão Ótica.....	64
5.3.	Rugosidade.....	65
5.4.	Ensaio tribológicos.....	65
5.5.	Análise e quantificação da espessura do revestimento.....	67
5.5.1.	Microscopia ótica.....	67
5.6.	Dureza.....	68
6.	Estudo de revestimentos do disco de serras circulares.....	69
6.1.	Objetivos.....	69
6.2.	Estudo comparativo do aço e revestimento de serra circular FREZITE e de outro fabricante.....	72
6.2.1.	Análise da Composição Química do aço das serras.....	73
6.2.2.	Análise e quantificação da espessura do revestimento através de microscopia ótica.....	75
6.2.3.	Análise da composição do revestimento.....	78
6.2.3.1.	Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS).....	78
6.2.4.	Dureza.....	80
6.2.4.1.	Comparação de dureza entre o revestimento e o metal base.....	80
6.2.4.2.	Dureza do aço na amostra em corte.....	80
6.2.4.3.	Dureza na superfície da serra circular.....	81
6.3.	Estudo de revestimento de Cromo Duro.....	87
6.3.1.	Estudo do ponto de implementação do revestimento de Cromo Duro no ciclo produtivo de serras circulares.....	88
6.3.2.	Análise e medição do revestimento de Cromo Duro.....	90
6.3.3.	Dureza.....	91
6.3.4.	Análise da resistência ao desgaste do revestimento de Cromo Duro.....	94
6.3.4.1.	Ensaio de desgaste por esfera rotativa.....	94
6.3.5.	Teste de Oxidação.....	96
6.4.	Estudo de revestimento de serras finas que diminua a aderência da madeira ao disco durante o corte.....	98

6.4.1.	Análise da Composição Química do revestimento	101
6.4.2.	Análise da superfície revestida através de SEM	104
6.4.3.	Medição da espessura do revestimento.....	106
6.4.4.	Dureza superficial.....	109
6.4.5.	Rugosidade superficial	110
6.4.5.1.	Rugosidade na direção do eixo dos xx	112
6.4.5.2.	Rugosidade na direção do eixo dos yy	114
6.5.	Análise da Composição Química do aço das serras Fabricante 2 e Fabricante 3	115
7.	Conclusões	117
8.	Trabalhos Futuros.....	119
9.	Referências.....	121
10.	Anexos.....	126
10.1.	Análise da composição química do aço da serra Fabricante 2 e 3.....	127

Índice de Figuras

Figura 1.1-O Grupo FREZITE.....	2
Figura 2.1-Esquema de serra circular com pormenor do dente.....	6
Figura 2.2-Exemplo de ranhura anti vibração.....	7
Figura 2.3-Diferentes formatos de ranhura de expansão.....	7
Figura 2.4-Anel tensor presente no corpo da serra circular.	8
Figura 2.5-Diferentes geometrias do gume cortante dos dentes	8
Figura 2.6-Exemplo de serra circular de dentes fixos.....	9
Figura 2.7-Exemplo de serra circular de dentes postiços (FREZITE).	10
Figura 2.8-Principais ângulos de um dente de serra circular.	10
Figura 2.9-Gráfico para determinar o diâmetro ou rpm de serras circulares.....	12
Figura 2.10-Gráfico para determinar o número de cortantes/velocidade de avanço	14
Figura 2.11-Diagrama que ilustra a dependência dos desgastes abrasivo, adesivo e por difusão	18
Figura 2.12-Distribuição típica das temperaturas numa serra circular durante o processo de corte	20
Figura 2.13-Distribuição das tensões na ferramenta de corte.	20
Figura 3.1-Constituição de um sistema tribológico substrato/revestimento.	22
Figura 3.2-Espessura da camada em função da temperatura de deposição de diferentes métodos de deposição de revestimentos	23
Figura 3.3-Espessuras do revestimento de Cromo Duro consoante a aplicação	24
Figura 3.4-Eletrodeposição de crómio.....	27
Figura 3.5-Espessuras não uniformes	29
Figura 3.6-Tanque e equipamento utilizado para realizar Cromo Duro: A-Ânodos de Chumbo; B-Ganchos; C-Barramento de Cobre.....	31
Figura 3.7-Gráfico que representa a relação de dureza com a temperatura de tratamento térmico.....	33

Figura 3.8-Diagrama esquemático de algumas variantes desenvolvidas com base na técnica de deposição PVD	35
Figura 3.9-Dureza a quente do ALCRONA e comparação com revestimentos à base de Titânio	37
Figura 3.10-Exemplos de peças que sofreram oxidação negra	40
Figura 3.11-Sequência industrial do processo de oxidação negra	40
Figura 4.1-Representação das irregularidades num perfil do estado de superfície	44
Figura 4.2-Tipologias dos desvios (irregularidades).....	45
Figura 4.3-Instrumento de apalpador: (a) rugosímetro ou (b) perfilómetro de contacto.....	45
Figura 4.4-Desvio médio aritmético (Ra)	46
Figura 4.5-Média aritméticas das alturas máximas do perfil de rugosidade-Rz (DIN).....	47
Figura 4.6-Aferição da espessura do revestimento do ensaio de abrasão esférica.....	49
Figura 4.7-Geometria da indentação no ensaio Vickers.....	51
Figura 4.8-Princípio do ensaio Rockwell, com penetrador conde de diamante, segundo a norma NP 141:1990.....	53
Figura 4.9- Diagrama de um “ <i>Scratch-Test</i> ” onde F designa a carga aplicada e F_c a carga crítica correspondente à perda de adesão na interface do revestimento com o substrato	54
Figura 4.10-Exemplo do indentação do <i>Scratch-Test</i>	55
Figura 4.11-Verificação da aderência do revestimento, usando ensaio Rockwell	55
Figura 4.12-Exemplo de fraturas aceitáveis e inaceitáveis no teste de indentação Rockwell	56
Figura 4.13-Tribómetro do CETRIB.....	57
Figura 4.14-Pormenor da esfera rotativa e do provete.....	57
Figura 4.15-Direções de medição do diâmetro da calote de desgaste.....	58
Figura 4.16-Microscópio Eletrónico de Varrimento (CEMUP).....	59
Figura 4.17-Interação entre os eletrões e a amostra	60
Figura 4.18-Exemplo de espetro EDS.....	61
Figura 5.1- <i>SPECTRO Max x</i> , Alemanha.....	64
Figura 5.2-Microscópio Ótico Industrial 3D- <i>Bruker NPFLEXTM</i>	65
Figura 5.3-Microscópio ótico <i>OLYMPUS PMG3</i>	67
Figura 5.4-Máquina de dureza EMCO-TEST.....	68
Figura 5.5-Microdurímetro Shimadzu HMV-200.....	68
Figura 6.1-Esquema geral do trabalho experimental.....	71

Figura 6.2-Esquema representativo dos métodos utilizados no referido trabalho experimental.	72
Figura 6.3- Serras circulares analisadas: a) FREZITE; b) Fabricante 1.....	72
Figura 6.4-Variação da dureza em função da temperatura do revenido.....	73
Figura 6.5-Gráfico representativo da composição química de cada aço.....	74
Figura 6.6-Microestrutura do aço da serra FREZITE (com ataque químico).	75
Figura 6.7-Microestrutura do aço da serra do Fabricante 1 (com ataque químico).....	75
Figura 6.8-Revestimento do disco da serra circular FREZITE (com ataque químico).	76
Figura 6.9-Medição da espessura do revestimento da serra circular FREZITE (sem ataque químico).	76
Figura 6.10-Revestimento do disco da serra circular Fabricante 1 (com ataque químico).	77
Figura 6.11- Medição da espessura do revestimento do disco da serra circular Fabricante 1 (sem ataque químico).	77
Figura 6.12-Espectro de composição do revestimento da serra FREZITE, por análise EDS.	78
Figura 6.13-Espectro de composição do revestimento da serra Fabricante 1, por análise EDS.	79
Figura 6.14-Comparação de microdureza HV 0.05 entre o revestimento e o metal base.	80
Figura 6.15-Amostra em corte: a) FREZITE; b) Fabricante 1.....	81
Figura 6.16-Representação da amostra da serra FREZITE.....	82
Figura 6.17-Representação da amostra da serra Fabricante 1.....	82
Figura 6.18-Gráfico representativo da dureza HV da superfície da serra, desde a periferia até ao centro da serra, utilizando uma carga de 5kgf.	83
Figura 6.19- Representação gráfica das microfotografias dos dentes da serra FREZITE: a) Amostra 1; b) Amostra 2.....	84
Figura 6.20-Representação gráfica das microfotografias amostras da serra Fabricante 1: a) Amostra 1; b) Amostra 2.....	85
Figura 6.21-Gráfico da distribuição microdureza HV 0.05 das diferentes amostras do dente.	86
Figura 6.22-Esquema representativo dos métodos utilizados no referido trabalho experimental.	87
Figura 6.23-Serra circular no estado em que é comercializada, sem revestimento superficial (Serra FREZITE Original).	88
Figura 6.24-Serra circular com revestimento Cromo Duro e posteriormente as pastilhas brasadas (Serra FREZITE Cromo1).....	89
Figura 6.25-Pormenor da zona oxidada.	89
Figura 6.26-Serra circular FREZITE com pastilhas brasadas e posteriormente revestimento Cromo Duro (Serra FREZITE Cromo 1).....	89
Figura 6.27-Serras circulares: a) FREZITE Original; b) FREZITE Cromo 2; c) FREZITE Cromo 1.....	90

Figura 6.28-Medição da espessura do revestimento de Cromo Duro da Serra FREZITE Cromo 1.....	91
Figura 6.29- Medição da espessura do revestimento de Cromo Duro da Serra FREZITE Cromo 2.....	91
Figura 6.30-Gráfico das Microdurezas no dente da serra, desde a periferia em direção ao centro.	93
Figura 6.31-Exemplo de calote de desgaste.	95
Figura 6.32-Gráfico representativo do Volume desgastado vs N° de Rotações.	95
Figura 6.33-Serra FREZITE sem Revestimento (FREZITE Original).....	96
Figura 6.34-Serra FREZITE Cromo 1.....	97
Figura 6.35-Serra FREZITE Cromo 2.....	97
Figura 6.36-Lamelas de madeira.....	98
Figura 6.37-Esquema representativo da terceira parte experimental.	99
Figura 6.38-Serra Circular Fina Fabricante 2.....	99
Figura 6.39-Serra Circular Fina Fabricante 3.....	100
Figura 6.40-Serra Circular Fina FREZITE Original.	100
Figura 6.41-Serra Circular Fina FREZITE Nova.	100
Figura 6.42-Mó de cortiça utilizada para o polimento da serra FREZITE Nova.	101
Figura 6.43-Espetro de composição do revestimento da serra Fina Fabricante 2, por análise EDS.....	102
Figura 6.44-Espetro de composição do revestimento da serra Fabricante 3, por análise EDS.....	102
Figura 6.45- Espetro de composição do revestimento da serra FREZITE Original, por análise EDS.	103
Figura 6.46-Espetro de composição do revestimento da serra FREZITE Nova, por análise EDS.	103
Figura 6.47-Tamanho de grão do óxido da serra Fabricante 2.	104
Figura 6.48-Tamanho de grão do óxido de ferro da serra Fabricante 3.	105
Figura 6.49-Tamanho de grão do óxido da serra FREZITE Original.....	105
Figura 6.50-Tamanho de grão do óxido da serra FREZITE nova.	106
Figura 6.51-Imagem obtida por SEM da zona fraturada do revestimento da serra Fabricante 2.	107
Figura 6.52- Imagem obtida por SEM da zona fraturada do revestimento da serra Fabricante 3.	107
Figura 6.53- Imagem obtida por SEM da zona fraturada do revestimento da serra FREZITE Original..	108
Figura 6.54- Imagem obtida por SEM da zona fraturada do revestimento da serra FREZITE Nova.....	108
Figura 6.55-Vista 3D da superfície de medição de rugosidade da serra Fabricante 2.....	111
Figura 6.56-Vista 3D da superfície de medição de rugosidade da serra Fabricante 3.....	111
Figura 6.57-Vista 3D da superfície de medição de rugosidade da serra FREZITE Original.	112

Figura 6.58-Vista 3D da superfície de medição de rugosidade da serra FREZITE Nova.....	112
Figura 6.59-Perfil de rugosidade (Ra) na direção do eixo dos xx, da superfície da serra Fabricante 2. ..	113
Figura 6.60-Perfil de rugosidade (Ra) na direção do eixo dos yy, da superfície da serra Fabricante 2. ..	114
Figura 10.1-Composição química do aço da serra Fabricante 2.	127
Figura 10.2-Composição química do aço da serra Fabricante 3.	128

Índice de Tabelas

Tabela 2.1-Velocidades de corte recomendáveis para diferentes tipos de madeira [12].	13
Tabela 2.2-Avanço por dente recomendável para diferentes tipos de madeira [12].	14
Tabela 3.1-Técnicas de deposição de revestimentos-Adaptado de [25].	23
Tabela 3.2-Propriedades físicas Cromo Duro-Adaptado de [28].	26
Tabela 3.3-Propriedades dos revestimentos metálicos-Adaptado de [37].	36
Tabela 3.4-Propriedades do revestimento AlCrN-ALCRONA [39].	38
Tabela 4.1-Métodos de medição da espessura de revestimento [17].	48
Tabela 4.2-Relação símbolo da dureza/força de ensaio nominal segundo a norma NP 711-1:1990 [49].	51
Tabela 6.1-Composição química do aço 75Cr1.	73
Tabela 6.2-Composição química (%) do aço de cada serra circular.	74
Tabela 6.3-Média da espessura de cada revestimento.	77
Tabela 6.4-Dureza do aço, na amostra em corte.	81
Tabela 6.5-Dureza ao longo das serras, da periferia para o centro da serra.	83
Tabela 6.6-Microdurezas HV 0.05 junto à zona termicamente afetada pelo calor.	86
Tabela 6.7-Durezas HRC de cada uma das serras FREZITE.	92
Tabela 6.8 -Microdurezas desde a Zona Termicamente Afetada pelo Calor para o centro da serra.	93
Tabela 6.9-Espessuras médias da camada oxidada de cada serra fina.	109
Tabela 6.10 -Dureza da superfície das serras.	109
Tabela 6.11-Rugosidade do corpo das serras finas.	110
Tabela 6.12 -Parâmetros de rugosidade medidos na direção do eixo dos xx.	113

Tabela 6.13-Parâmetros de rugosidade medidos na direção do eixo dos yy. 114

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

CETTRIB	Laboratório de Tribologia, Vibrações e Manutenção Industrial
CV	Cavalos
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i> (Deposição Química em Fase de Vapor)
EDS	Espetroscopia de Energia Dispersiva
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
MDF	Medium Density Fiberboard
MEV	Microscopia Eletrónica de Varrimento
P3e TM	Emulsão Pulsada de Eletrões
PACVD	Plasma- Assisted Chemical Vapour Deposition (Deposição de vapor químico assistido por plasma)
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i> (Deposição Física em Fase de Vapor)
rpm	Rotações por minuto
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
CW	Carboneto de Tungsténio

Lista de símbolos

A	Diâmetro da cratera do substrato (ensaio de desgaste por esfera rotativa)
A _e	Área lateral da impressão (ensaio de dureza e microdureza Vickers)
B	Diâmetro total da cratera (ensaio de desgaste por esfera rotativa)
b _{par}	Diâmetro da calote paralelo ao sentido de rotação da esfera (ensaio de desgaste por esfera rotativa)
b _{per}	Diâmetro da calote perpendicular ao sentido de rotação da esfera (ensaio de desgaste por esfera rotativa)
D	Diâmetro de corte (cálculo da velocidade de corte)
F	Carga aplicada (<i>Scratch-Test</i>)
F ₀	Carga inicial (ensaio de dureza Rockwell-C)
F ₁	Carga adicional (ensaio de dureza Rockwell-C)

F_c	Carga crítica (<i>Scratch-Test</i>)
F_e	Força de ensaio nominal (ensaio de dureza e microdureza Vickers)
F_T	Força Total (ensaio Rockwell-C)
g	Aceleração da gravidade (ensaio de dureza e microdureza Vickers)
K_s	Coefficiente de desgaste (ensaio de desgaste por esfera rotativa)
L_r	Comprimento de base (medição de rugosidade)
L_n	Comprimento final (medição de rugosidade)
L_m	Comprimento de avaliação (medição de rugosidade)
n	Rotações por minuto (cálculo da velocidade de corte e de avanço)
R_a	Rugosidade média aritmética (medição de rugosidade)
$R_{máx}$	Valor máximo da profundidade individual da rugosidade (medição de rugosidade)
R_z	Média das alturas máximas do perfil de rugosidade (medição de rugosidade)
S	Distância de escorregamento (ensaio de desgaste por esfera rotativa)
S_z	Avanço por dente em mm por rotação (cálculo da velocidade de avanço)
t	Espessura do revestimento (ensaio de desgaste por esfera rotativa)
V	Volume desgastado (ensaio de desgaste por esfera rotativa)
WD	Distância de trabalho
z	Número de dentes de uma serra circular
α	Ângulo de saída frontal
β	Ângulo de ponta
γ	Ângulo de corte

Capítulo 1

Introdução

A investigação e desenvolvimento de novos produtos e técnicas devem ser encarados como elementos fundamentais para a evolução de uma empresa. Neste sentido, este estudo, realizado em parceria com a empresa FREZITE-Ferramentas de Corte, SA, consistiu numa análise de diferentes revestimentos do disco de serras circulares, comparando com produtos de outras empresas.

Este trabalho teve como objetivo principal, estudar diferentes revestimentos do disco de serras circulares para corte de madeira, sujeito a desgaste abrasivo durante o processo, bem como à modificação de uma etapa do processo de fabrico de serras circulares.

Após esta introdução (capítulo 1) é apresentada uma revisão bibliográfica elaborada com base na literatura, em artigos científicos e em empresas operando neste setor industrial.

É dedicado o capítulo 2 ao processo de corte com serras circulares, onde se refere a constituição de uma serra circular, bem como as suas características e especificações, faz-se uma breve classificação de serras circulares e uma descrição do processo de fabrico das mesmas. Também se aborda os mecanismos de desgaste e problemas que surgem durante o corte de madeira.

No capítulo 3, são abordados os revestimentos que podem ser utilizados no disco de serras circulares e as técnicas de deposição desses mesmos revestimentos.

Seguidamente, no último capítulo da revisão bibliográfica (capítulo 4), abordam-se as técnicas de caracterização estrutural de revestimentos, ou seja, as técnicas de análise utilizadas

2 Introdução

para caracterizar os revestimentos, tais como ensaios de dureza, ensaios de aderência e de desgaste. Também se descrevem as técnicas de análise morfológica e caracterização da composição química de superfícies revestidas.

A parte experimental deste trabalho, inicia-se no capítulo 5, onde se descrevem as técnicas experimentais utilizadas na análise dos diferentes revestimentos.

Em seguida, no capítulo 6, apresenta-se o trabalho realizado onde serão estudados diferentes revestimentos de serras FREZITE e de outras empresas, como será explicado no capítulo em questão.

Finalmente são apresentadas as conclusões no capítulo 7, sendo também referidas algumas sugestões para trabalhos futuros (capítulo 8), nesta área de investigação.

1.1. A FREZITE

A FREZITE é uma empresa de Engenharia direcionada para o fabrico de ferramentas de corte de alta precisão, com aplicações nas indústrias de transformação da madeira, plásticos, materiais compósitos e metais [1].

Fundada em 1978, conta com uma vasta experiência na conceção, desenvolvimento e produção de ferramentas de corte por arranque de aparas. A conceção de um novo produto é um trabalho de equipa que começa no primeiro contacto com o cliente, mantendo-se o acompanhamento e assistência aos produtos na fase pós-venda [1].

A FREZITE está constantemente a desenvolver novas soluções com novos produtos e a procurar a melhor interpretação dos mercados, destacando-se, assim, nos mercados industriais mais competitivos e garantindo um desenvolvimento sustentável. De origem portuguesa, é uma empresa presente em mais de 50 países distribuídos pelos diferentes continentes, constituindo todas estas sucursais o Grupo FREZITE [1].



Figura 1.1-O Grupo FREZITE.

1.2. A madeira

Tendo cedido o seu lugar aos metais em vários domínios, desde há longos anos, a madeira vem recuperando, em larga medida, a sua antiga preponderância, podendo mesmo afirmar-se que, nalguns setores, tem penetrado no campo considerado estritamente específico dos materiais metálicos. Assim, e no que concerne à madeira comprimida, assinala-se o seu emprego na manufatura de dobradiças, bicicletas, rodas dentadas e pinhões de ataque [2].

Pode dizer-se que o aparecimento dos contraplacados constitui uma autêntica revolução nas indústrias ligadas, nomeadamente, ao mobiliário, à construção civil, à construção naval e à construção de aeronaves, exigindo ferramentas de corte de qualidade elevada [2].

Sendo o mais antigo material de construção usado pelo homem, a madeira “é ao mesmo tempo, entre os muitos materiais estruturais básicos importantes, o mais e o menos conhecido” [2].

1.3. Problemática do corte de madeira

A madeira possui alguns defeitos naturais que influenciam o desempenho da ferramenta durante o processo de corte. Entre os principais defeitos estão a granulometria irregular, variações na largura dos anéis de crescimento, crescimento excêntrico, nós, tecidos de cicatrização, bem como substâncias químicas, tais como resinas, óleos, gomas, compostos aromáticos e sais de ácidos orgânicos [2].

Os problemas decorrentes das variações de granulometria, fissuras superficiais e contrações podem ser corrigidos ou minimizados através do uso de técnicas adequadas de processamento, maquinagem e acabamento [3].

Para além dos defeitos e substâncias químicas apresentados anteriormente, o teor de humidade é uma propriedade física com grande influência durante as operações de corte. Assim, a água na madeira pode preencher os espaços vazios dentro das células ou entre elas (água livre ou água de capilaridade), pode estar impregnada nas paredes das células (água de adesão) ou pode existir na estrutura química do próprio tecido (água de constituição) [2]. O teor de humidade da madeira seca ao ar é aproximadamente entre 13 % e 17%. O teor de humidade é expresso em relação ao peso seco, de acordo com a seguinte expressão [2]:

$$\text{Teor de humidade da madeira (\%pond.)} = \frac{\text{peso de água da amostra}}{\text{peso da amostra seca}} \times 100\% \quad (1.1)$$

4 Introdução

Uma vez que a percentagem de água é calculada em relação a uma amostra seca, o teor de humidade de uma madeira pode, por vezes, exceder 200 % [4].

Assim sendo, no fabrico de ferramentas de corte de madeira, há que ter em atenção todos os defeitos apresentados para que se consiga minimizar os efeitos destes durante a operação em causa.

É de salientar que a madeira que possui defeitos é apelidada de madeira de 2ª classe e pode ser reaproveitada pela valorização dos mesmos preenchidos com bioplástico reciclado [5].

Capítulo 2

Processo de corte com serras circulares

As serras circulares são as ferramentas de corte mais utilizadas para corte de madeira, operação que requer elevada precisão dimensional, bem como bom acabamento da superfície de corte [6].

As serras circulares podem apresentar uma grande variedade de diâmetros, espessuras, números de dentes e formato dos dentes. Geralmente, quanto maior o diâmetro do disco da serra, maior será a sua espessura [7].

Estas ferramentas são constituídas essencialmente por um disco de aço e dentes de corte brasados na sua extremidade, sendo na sua maioria pastilhas de metal duro (pastilhas de carboneto de tungstênio).

Hoje em dia, existe uma grande preocupação em otimizar o material utilizado no fabrico do disco da serra porquanto, além de minimizar os problemas resultantes do corte, permite que as serras sejam o mais finas possível; a redução da espessura da serra é benéfica na medida em que diminui a quantidade de material necessário para o seu fabrico, bem como a perda de material cortado, e aumenta a precisão de corte [8], no entanto sendo a serra mais fina, estará sujeita a maior flexão durante o processo de corte, problema central no fabrico de serras circulares.

É de igual modo importante minimizar a aderência de resíduos, bem como resina ou seiva de árvores no disco e nos dentes. Assim, impede-se a fricção, o disco da serra aquece

menos, aumentando-se a durabilidade da serra. Para tal, é necessário utilizar um revestimento que proteja todo o disco.

Este capítulo é dedicado ao processo de corte com serras circulares, onde se refere a constituição de serra circular, bem como as suas características. Faz-se uma breve classificação de serras circulares e uma descrição do processo de fabrico das mesmas. Também se abordam os mecanismos de desgaste e problemas que surgem durante o corte de madeira.

2.1. Características e Especificações

De um modo geral, as serras possuem características que permitem melhorar a qualidade do corte, entre as quais ranhuras anti vibração, ranhuras de expansão e anel tensor. Na Figura 2.1 pode-se visualizar um esquema de serra circular, com o pormenor dos dentes e pastilhas.

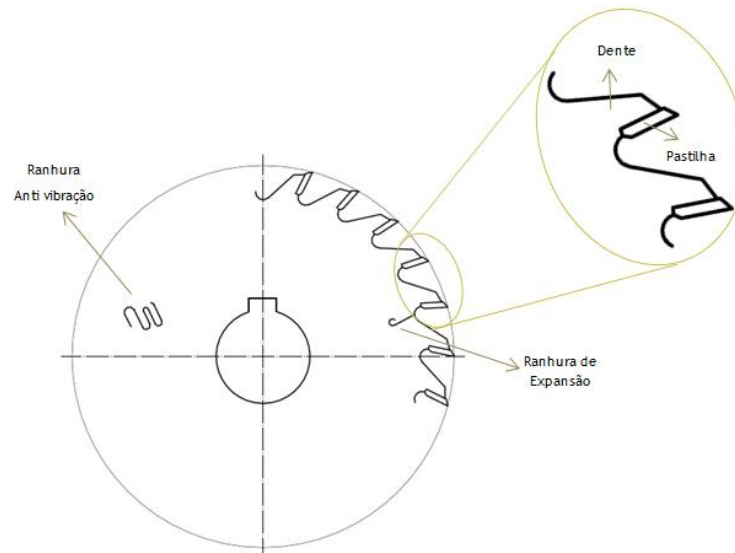


Figura 2.1-Esquema de serra circular com pormenor do dente.

- **Ranhuras anti vibrações**

As ranhuras anti vibrações permitem um amortecimento durante a operação de corte. O seu enchimento com poliuretano elimina parte da energia, reduzindo significativamente as vibrações, bem como as emissões sonoras. Deste modo, melhora-se a qualidade do disco e a durabilidade [9].



Figura 2.2-Exemplo de ranhura anti vibração.

- **Ranuras de expansão cortadas a laser**

Durante a operação de corte é gerado calor que pode causar a expansão ou deformação do disco da serra circular. Deste modo, as ranhuras de expansão cortadas a laser evitam deformações e tensões nocivas. O disco da serra mantém-se perfeitamente plano e o formato especial contribui para um funcionamento silencioso [9].

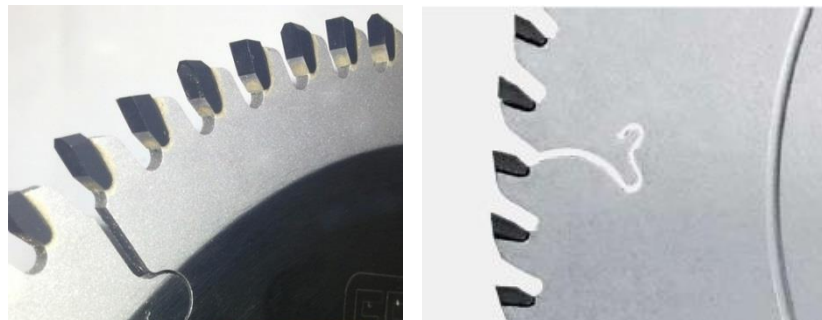


Figura 2.3-Diferentes formatos de ranhura de expansão.

- **Anel tensor**

O anel tensor aumenta a rigidez do disco da serra. Durante o fabrico, cada disco é pré-tensionado individualmente até que se consiga obter uma serra calibrada [9].



Figura 2.4-Anel tensor presente no corpo da serra circular.

- **Geometria dos dentes**

A geometria do gume cortante dos dentes das serras também depende do tipo de madeira a ser cortada, teor de humidade, direção das fibras em relação à direção de corte e potência de corte.

A utilização de máquinas de tecnologia de ponta e as mais estritas tolerâncias, em conjunto com discos de lixa muito finos, contribuem para gumes perfeitos e garantem cortes com a máxima precisão [9].



Figura 2.5-Diferentes geometrias do gume cortante dos dentes [10].

2.1.1. Materiais das pastilhas de corte

O material utilizado nas pastilhas de corte varia consoante o tipo de madeira a cortar. De seguida, são apresentados os materiais que podem ser utilizados, bem como uma breve descrição dos mesmos.

- **Carbonetos** consistem em partículas de carboneto geralmente unidas por um aglutinante de metal mais macio. Possuem uma resistência ao desgaste elevada. A uma liga de carboneto de tungsténio (WC) chama-se metal duro [10].
- **Stellite™** e ligas de cromo-cobalto são mais adequados quando existe muita corrosão. Podem ser soldados ao dente [10].

- **Diamante poli-cristalino** é muito caro, mas tem uma elevada durabilidade. É apropriado para o corte de MDF (*Medium Density Fiberboard*) e painéis revestidos. O diamante é colocado sobre uma ponta do carboneto e depois brasado no dente [10].
- **Cermet** é um metal duro com partículas duras à base de titânio. O nome cermet combina as palavras cerâmica e metal, que possuem elevada resistência ao desgaste e resistente à corrosão. No entanto, são muito frágeis. Antes de serem soldados ao dente, precisam de uma preparação especial [10].

2.2. Classificação das serras circulares

Quanto ao tipo, as serras circulares podem ser classificadas em serra de dentes fixos e serra de dentes postiços. As serras de dentes fixos são geralmente em aço ao carbono e fabricadas através de estampagem, que define o formato dos dentes, os quais são posteriormente afiados [7].



Figura 2.6-Exemplo de serra circular de dentes fixos.

Quanto às serras de dentes postiços, a maioria dos modelos são fabricados para aplicações especiais, sendo as mais comuns as serras com dentes com pastilhas de metal duro, nomeadamente, carboneto de tungstênio [7].



Figura 2.7-Exemplo de serra circular de dentes postiços (FREZITE).

Nas serras de dentes com pastilhas, estas são brasadas em rebaixas preparados na superfície frontal dos dentes da serra e posteriormente são afiados.

O número de dentes é influenciado pelo tipo de trabalho, acabamento ou desbaste, altura dos dentes, espécie de madeira, tipo de apra produzida, potência de corte necessária, velocidade de corte e velocidade de avanço [3].

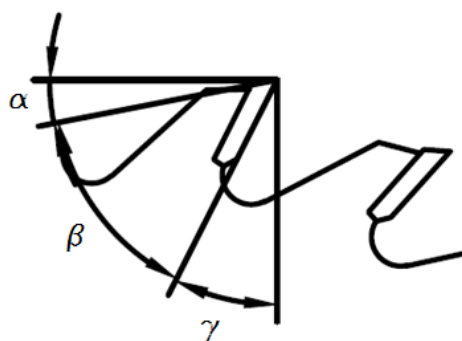


Figura 2.8-Principais ângulos de um dente de serra circular.

O ângulo de corte (γ) torna-se necessário para evitar atritos que aumentam o esforço de maquinagem. Quanto maior o ângulo melhor será a sua penetração na madeira. Porém, se for muito grande pode danificar-se [11]. Se for muito pequeno, o gume pode não penetrar adequadamente, dificultando o avanço da peça. Ângulos de corte menores que 5° podem causar sobreaquecimento na ferramenta e forte desgaste do gume, gerando um mau acabamento. Também causa a perda da resistência da ferramenta devido à redução do ângulo de cunha da ferramenta. Para a maioria dos fabricantes de serras circulares, o seu valor ideal situa-se entre 5° e 15° [11].

O ângulo de ponta (β) deve ser suficientemente grande para garantir a rigidez do dente. O seu valor varia entre 35° para madeiras macias e 65° para madeiras duras. A variação deste ângulo é dependente do tipo de material e da metodologia empregue na sua fabricação [11].

O ângulo de saída frontal (α) é o ângulo relacionado com a superfície de saída (face) da ferramenta, sobre a qual escoo o material da peça (apara). O ângulo de saída frontal interfere decisivamente na força e na potência necessária para o corte, na resistência da ferramenta, na qualidade do acabamento do corte e no calor gerado durante o processo [11].

Para madeiras duras de alta densidade e resistência é necessário adotar um ângulo menor do que em madeiras macias de baixa densidade. De um modo geral, quanto maior o ângulo de saída, menor o esforço de corte necessário, porém, menor a rigidez do gume cortante, e menor a qualidade superficial da peça maquinada. Também, para maiores velocidades de avanço são exigidos um ângulo de saída maior [11].

Para madeiras macias, são geralmente utilizados ângulos de saída elevados. Para madeiras duras, é necessário usar valores menores, que tendem a elevar a potência de corte [11].

Quanto mais mole e “verde” a madeira, menor o número de dentes [7].

2.3. Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte variam consoante o tipo de madeira que se pretende cortar.

2.3.1. Velocidade de corte

A velocidade de corte, ou seja, a velocidade dos pontos da periferia dos cortantes de uma ferramenta é calculada em função do diâmetro da serra no ponto de corte considerado e do número de rotações (velocidade angular), de acordo com a seguinte expressão [12]:

$$V_c = \frac{D \times \pi \times n}{1000 \times 60} \text{ (m/s)} \quad (2.1)$$

Em que:

D= Diâmetro de corte em mm

n = Número de rotações por minuto

Outra maneira de determinar o diâmetro, o número de rotações por minuto (rpm) ou a velocidade de corte de serras circulares é utilizando o gráfico da Figura 2.9.

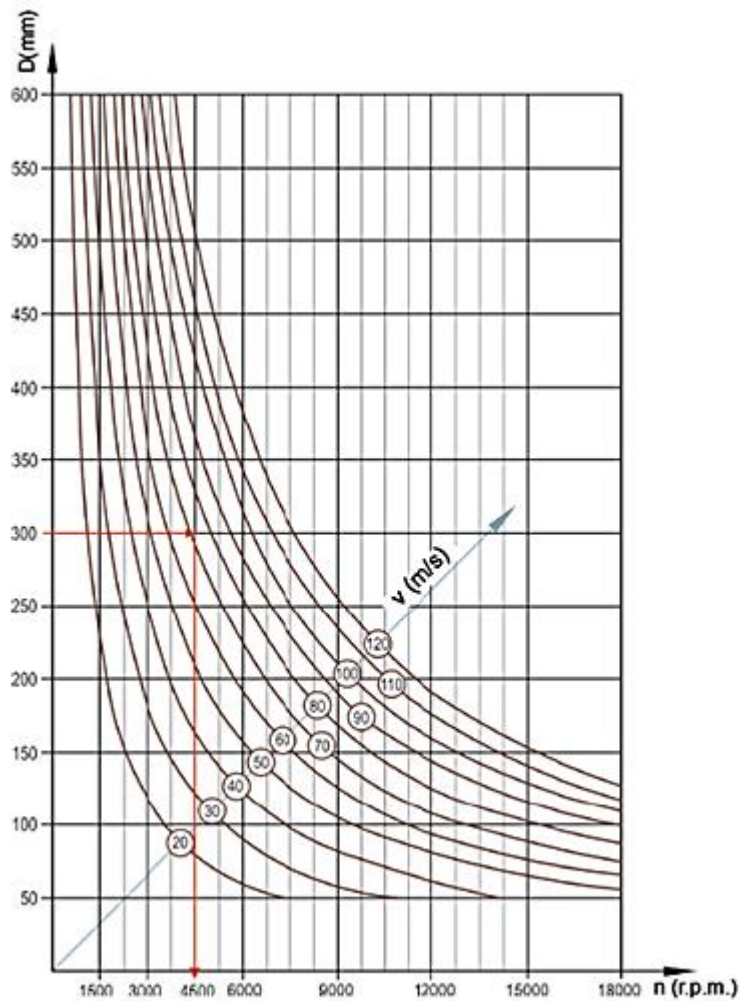




Figura 2.9-Gráfico para determinar o diâmetro de corte (D) ou rpm de serras circulares (n) [12].

Na Tabela 2.1 apresentam-se as velocidades de corte recomendáveis para os diferentes tipos de madeira.

Tabela 2.1-Velocidades de corte recomendáveis para diferentes tipos de madeira [12].

Velocidades de corte recomendáveis para diferentes tipos de madeira		V _c (m/s)
	Madeira macia	60-100
	Madeira dura	55-90
	Madeira exótica	50-85
	Contraplacados	50-80
	Aglomerados	60-80
	Aglomerados com revestimento plástico	60-80
	MDF	60-80

2.3.2. Velocidade de Avanço

A qualidade de uma superfície está associada ao avanço de corte que depende sobretudo do avanço de cada cortante e do número de cortantes da ferramenta [12].

A velocidade de avanço, assim como outros parâmetros, também são influenciados por fatores como tipo de madeira, teor de humidade, potência disponível e altura de corte [3].

A velocidade de avanço (U) pode ser facilmente determinada através da seguinte expressão:

$$U = \frac{S_z \times n \times z}{1000} \text{ (m/min)} \quad (2.2)$$

Em que:

S_z = Avanço por dente em mm por rotação

n = Número de rotações por minuto

z = número de cortantes da ferramenta

É possível determinar o número de cortantes ou a velocidade de avanço, através do gráfico da Figura 2.10.

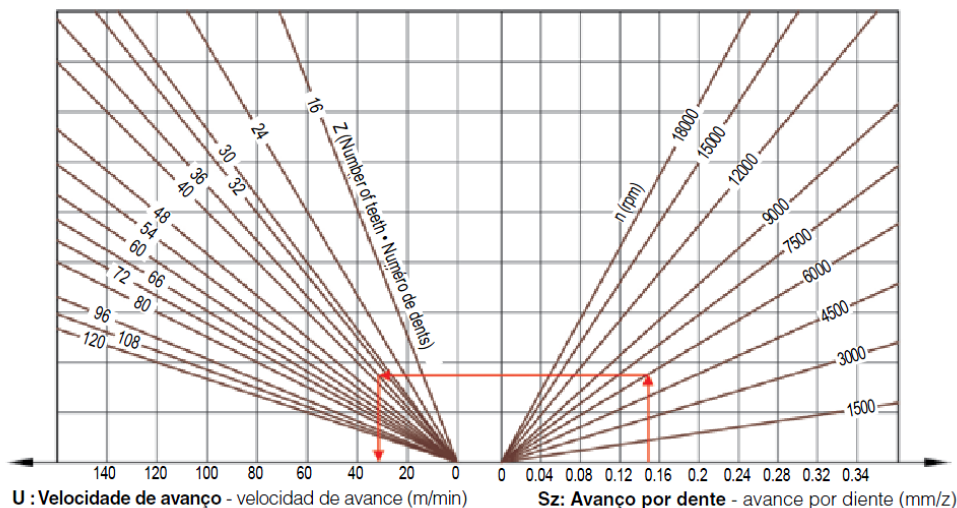


Figura 2.10-Gráfico para determinar o número de cortantes/velocidade de avanço [12].

Na Tabela 2.2 apresenta-se o avanço por dente recomendável para os diferentes tipos de madeira.

Tabela 2.2-Avanço por dente recomendável para diferentes tipos de madeira [12].

Avanço por dente em mm por rotação recomendável para diferentes tipos de madeira	S_z (mm)
Madeira maciça	0,10-0,20
Contraplacados	0,05-0,25
Painel de partícula dura	0,03-0,08
Aglomerados com revestimento plástico	0,03-0,06

2.4. Material das Serras Circulares

A obtenção de um material com as características adequadas ao fabrico de ferramentas de corte apenas é possível após uma análise cuidada e ponderada de um conjunto de propriedades mecânicas, físicas e químicas e da sua evolução com a temperatura, requeridas pelas funções a desempenhar, destacando-se as seguintes [13]:

- Tensão de rotura;
- Tensão limite de elasticidade;
- Dureza;
- Tensão limite de fadiga;
- Adesão;
- Afinidade química (solubilidade);
- Difusão;
- Oxidação.

Assim, é possível definir as características consideradas mais apropriadas para as ferramentas de corte [13]:

- Elevada resistência ao desgaste;
- Elevada dureza a frio e a quente;
- Elevada tenacidade;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Elevada condutibilidade térmica;
- Baixo coeficiente de dilatação.

As ferramentas revestidas buscam o equilíbrio entre as características necessárias através do uso de um material base, que confere tenacidade e alguma dureza, e um revestimento, com elevada dureza, resistência à abrasão e inércia química [14].

2.4.1. Aços ao carbono para ferramentas

Neste grupo estão incluídos os aços ao carbono com ou sem adição de pequenos teores de elementos de liga, tais como cromo e vanádio [15].

Os desenvolvimentos verificados com a introdução dos revestimentos permitem que, conservando a tenacidade de um substrato, as ferramentas revestidas operem a velocidades de corte superiores, devido à elevada resistência ao desgaste, dureza a quente e estabilidade química dos revestimentos utilizados [13].

2.5. Processo produtivo de serra circular

O processo produtivo de uma serra circular inicia-se com o corte da geometria em chapas de aço, por corte a laser. Por sua vez, o corte a laser provoca o endurecimento das superfícies de corte, pelo que é necessário a geometria ir ao forno para realizar um revenido, de maneira a reduzir a dureza dessa zona [16].

Em seguida, a peça é retificada para melhorar o seu desempenho. Nesta etapa, retifica-se a planeza da serra, o assento do dente de corte, e o furo central que é retificado para uma tolerância H7 [16].

Com o objetivo de obter estabilidade da serra durante a sua rotação, introduzem-se tensões residuais através do tensionamento de um ou dois anéis. Está provado que este processo confere estabilidade à serra durante o corte, possibilitando um melhor acabamento das peças a cortar [16].

A colocação da pastilha de corte, em metal duro ou outro, é realizada através de uma brasagem e de um revenido localizado. No entanto, como este processo é realizado em contacto com o ar ambiente, causa a oxidação da serra junto ao dente devido às altas temperaturas utilizadas no processo de brasagem. Para contornar este problema, é feita uma limpeza da oxidação resultante por decapagem com jato de areia [16].

Para finalizar a produção de uma serra, é necessário afiar os dentes de acordo com a finalidade da serra. O afiamento realiza-se através de mós, onde se definem os diversos ângulos a utilizar no dente [16].

Por fim, é feita uma gravação a laser das características da serra e é lubrificada para não oxidar.

2.6. Durabilidade das serras circulares

Apesar de, numa serra circular, o material cortante serem os dentes com pastilhas geralmente de CW, o disco da serra acaba também por estar sujeito a um contacto com a madeira. Este contacto a altas velocidades pode ser responsável, por exemplo, por problemas de desgaste por abrasão do aço utilizado, bem como oxidação do disco [8].

O desempenho tribológico de um sistema de revestimento é, portanto, o resultado de uma combinação de um elevado número de variáveis, como por exemplo a dureza, o módulo de elasticidade, a espessura do revestimento, tensões residuais e a morfologia da superfície (rugosidade) dos materiais que englobam um sistema [17] [18]. No caso das superfícies

revestidas, este número de variáveis é ampliado, devido à introdução das variáveis referentes ao processo de relação entre o revestimento e o substrato [17].

Os principais fatores que condicionam os mecanismos de desgaste presentes num contacto com uma superfície revestida são [17]:

- Coeficiente de atrito;
- Rugosidade;
- Dureza do substrato;
- Distribuição de tensões;
- Velocidade de corte;
- Humidade ambiente;
- Temperatura de trabalho;
- Processo de realização do revestimento;
- Material do revestimento;
- Espessura do revestimento;
- Dureza do revestimento;
- Aderência do revestimento ao substrato.

Na verdade, não só a dureza do substrato e o revestimento são importantes, a fim de alcançar um bom desempenho tribológico, pelo que têm de ser considerados também os diferentes modos de deformação. Uma maneira de quantificar esses modos de deformação é usar rácios de propriedades. Por exemplo, a relação entre a dureza e o módulo de elasticidade (H/E) fornece informações sobre as deformações plásticas (irreversíveis) e as deformações elásticas (reversíveis) [18].

2.6.1. Mecanismos de Desgaste

Existem vários mecanismos de desgaste (desgaste por abrasão, difusão, adesão e oxidação) [19]. Estes mecanismos podem atuar de uma forma isolada ou combinada total ou parcialmente [13], como representado na Figura 2.11.

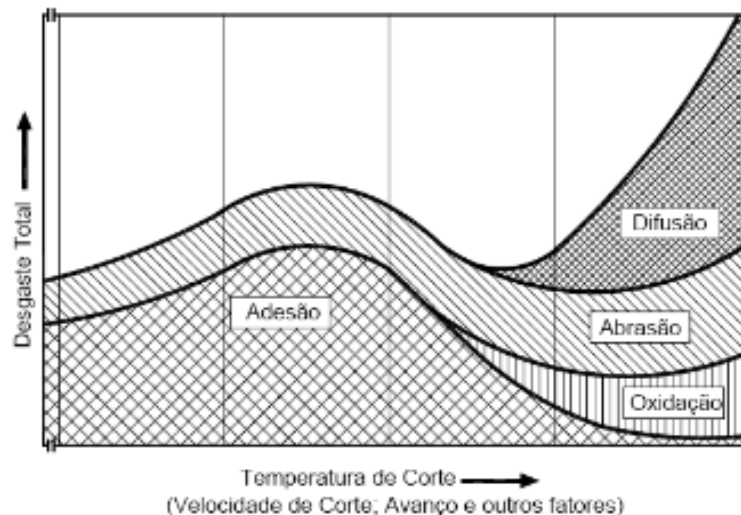


Figura 2.11-Diagrama que ilustra a dependência dos desgastes abrasivo, adesivo e por difusão [13].

Em seguida serão descritos os diferentes tipos de desgaste mais comuns num processo de corte de madeira.

- **Desgaste por abrasão**

Este desgaste é típico de um mecanismo duro e rugoso que desliza sobre uma superfície provida de um revestimento.

As partículas terão um efeito abrasivo na superfície e, como se tornam responsáveis pela transmissão de grande parte da carga aplicada, causam picos de tensão concentrados na superfície, onde têm tendência a penetrar. Os altos picos de pressão podem dar origem a fraturas no revestimento [17].

A remoção de material é devida principalmente a partículas duras e pontiagudas que estão presentes na madeira. Assim, provocam na superfície da ferramenta arranhões, sulcos, micro-aparas, alterações dimensionais e pontos brilhantes.

- **Oxidação**

Normalmente, devido ao elevado aquecimento da ferramenta de corte e à influência do meio em que se efetua a maquinagem, pode ocorrer o fenómeno de oxidação de algumas zonas da ferramenta.

Este tipo de mecanismo de desgaste atua de forma mais acentuada a altas velocidades de corte e quando o material da ferramenta for constituído por aço rápido ou alguns tipos de carbonetos sinterizados [13].

- **Corrosão**

A corrosão decorre através de uma reação química ou eletroquímica entre um metal e substâncias que entram em contato com ele, por exemplo, soluções eletrolíticas, gases húmidos ou fusões. As cargas mecânicas também promovem a corrosão. Os resultados são o desgaste interno, a corrosão alveolar e fissuras [13].

2.7. Sobreaquecimento do disco durante o corte

Durante o processo de corte, o disco da serra aquece principalmente devido ao atrito entre os dentes e as superfícies laterais do disco com a peça. Este calor é dissipado para o meio envolvente, bem como para a peça. Existem muitos fatores que influenciam o campo de temperaturas na ferramenta, tais como as características geométricas da ferramenta de corte, a condutividade de calor do material da ferramenta e o calor específico [20].

As altas temperaturas são responsáveis pelo desfavorável estado de tensão no disco da serra, e também pela diminuição da resistência do aço da serra e a resistência ao desgaste.

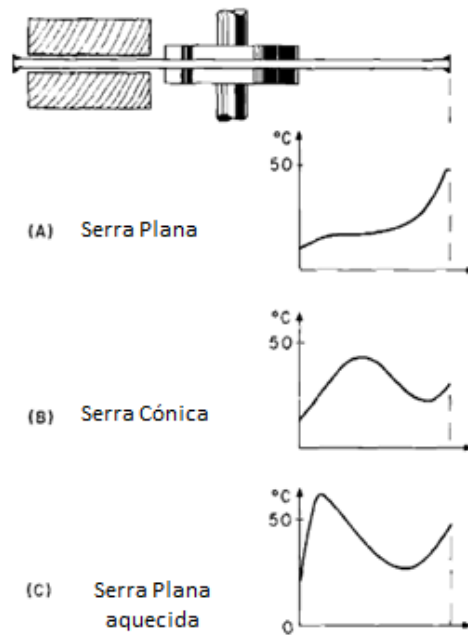


Figura 2.12-Distribuição típica das temperaturas numa serra circular durante o processo de corte-Adaptado de [21].

Uma temperatura de 300°C na extremidade dos dentes, por exemplo, faz com que ocorra aproximadamente uma redução de 10% da tensão de cedência de uma serra e 450°C causa uma redução de aproximadamente 25% no rendimento [21].

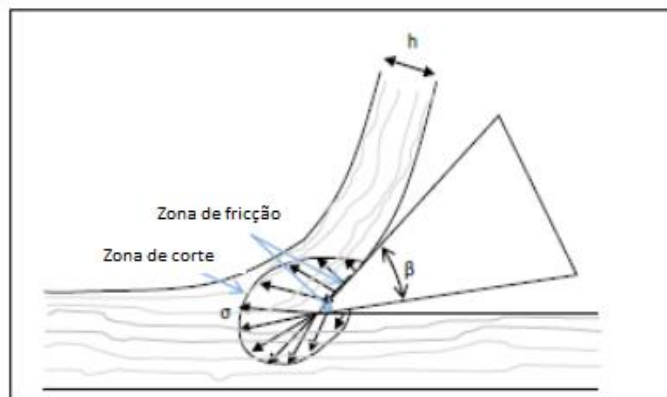


Figura 2.13-Distribuição das tensões na ferramenta de corte-Adaptado de [20].

Capítulo 3

Revestimento do disco de serras circulares

A proteção das superfícies tem sido objeto de preocupação por parte da indústria, pelo que têm vindo a ser desenvolvidos estudos aprofundados, com a intenção de melhorar as características da dita superfície através de tratamentos ou deposição de revestimentos [18].

Inicialmente, os revestimentos começaram a ser utilizados como método de proteção, para combater a degradação dos materiais de base. Estes revestimentos começaram por ser simples compostos orgânicos, como as tintas, mas recentemente evoluíram para revestimentos dos mais diversos materiais [22].

Mais tarde, surgiram os revestimentos funcionais, nomeadamente os aplicados sobre materiais ferrosos, conferindo assim melhores propriedades ao produto final e com custos bastante inferiores, desenvolvendo-se ferramentas revestidas capazes de suportar ambientes e condições adversas [18]. Começaram a ser aplicados revestimentos de materiais mais resistentes à oxidação, e também com propriedades mecânicas muito diferentes dos substratos.

Esta evolução conduziu ao desenvolvimento de revestimentos com estruturas mais complexas onde se enquadram com grande potencial os revestimentos nanoestruturados [22].

De uma forma geral, a utilização dos revestimentos está associada a uma vasta gama de necessidades, que podem ser eventualmente resumidas da seguinte forma [23]:

- Melhorar o aspeto visual das superfícies;
- Proteger as superfícies contra a corrosão;

- Diminuir o coeficiente de atrito das superfícies;
- Melhorar o comportamento das superfícies ao desgaste por abrasão, erosão, adesão ou fadiga.

Neste capítulo é feita uma descrição dos revestimentos que podem ser utilizados no disco de serras circulares, bem como as possíveis técnicas de deposição dos mesmos.

3.1. Aplicação de revestimentos

A aplicação de revestimentos consiste basicamente na deposição de um material que é selecionado previamente sobre um material de base, o substrato [17].

O material para o revestimento é escolhido de acordo com as características que se pretendem implementar na superfície e no material do substrato [17].

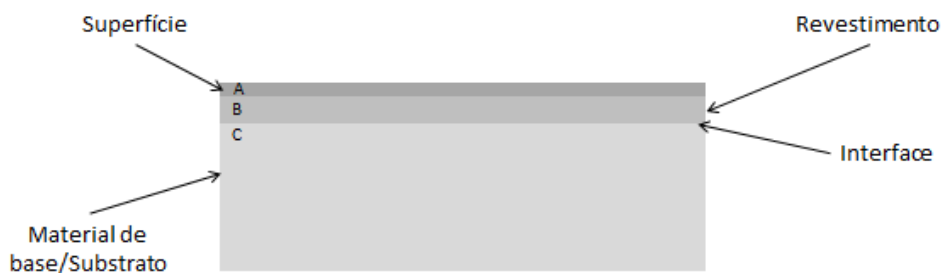


Figura 3.1-Constituição de um sistema tribológico substrato/revestimento.

A espessura do revestimento depende de diversos fatores, entre os quais: o tipo de material que se escolheu para o revestimento; o trabalho de proteção que o revestimento vai desempenhar; e o método de deposição escolhido [17].

Os revestimentos podem ser aplicados por uma variada gama de processos, que vão desde a eletrodeposição até às técnicas mais recentes de deposição em fase de vapor, tais como o PVD (*Physical Vapour Deposition*) ou CVD (*Chemical Vapour Deposition*), que serão abordados mais à frente [24].

Na Figura 3.2, é possível observar a espessura do revestimento para um determinado método de deposição (Tabela 3.1) em função da temperatura do revestimento, segundo a empresa de revestimentos *Oerlikon Balzers*.

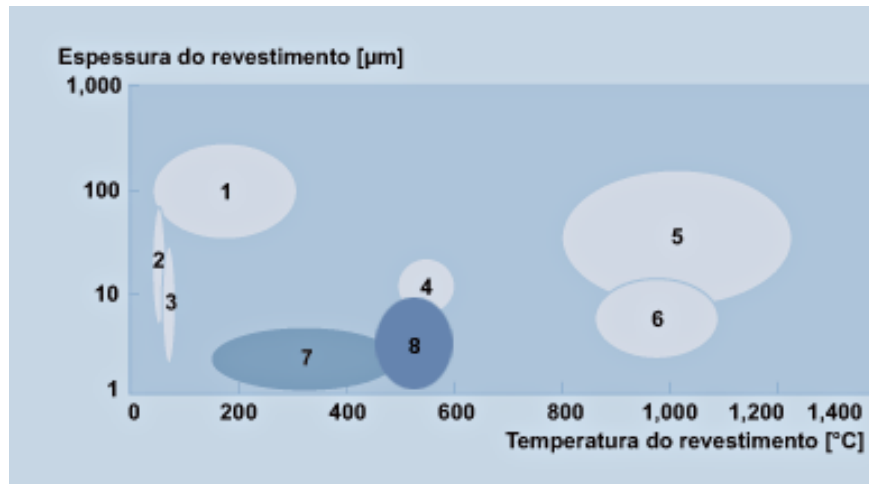


Figura 3.2-Espessura da camada em função da temperatura de deposição de diferentes métodos de deposição de revestimentos [25].

Tabela 3.1-Técnicas de deposição de revestimentos-Adaptado de [25].

1	Pulverização por plasma
2	Eletrodeposição e Deposição química
3	Fosfatação
4	Nitretação (camada branca)
5	Boronização
6	CVD
7	PVD ¹ , PACVD ²
8	P3e ^{TM3}

Em seguida, serão descritos os revestimentos que, eventualmente, podem ser utilizados para proteção do disco de serras circulares.

3.2. Revestimentos Metálicos

Os revestimentos metálicos constituem um dos processos mais importantes de proteção anticorrosiva. Para além da proteção, permitem melhorar as características físicas e estéticas, visto que as peças com este tipo de revestimento possuem bom acabamento [26].

Das técnicas usadas mais frequentemente para a aplicação dos revestimentos metálicos destacam-se as seguintes: eletrodeposição; imersão a quente; aspersão térmica e deposição em fase de vapor (CVD e PVD) [26].

¹ PVD -Deposição física em fase de vapor

² PACVD- Deposição de vapor químico assistido por plasma

³ P3eTM - Emissão Pulsada de Eletrões

A eletrodeposição é um dos processos de deposição mais importantes na obtenção de revestimentos metálicos porque apresenta vantagens tanto económicas, como operacionais [26]. A eletrodeposição de Cromo Duro é vulgarmente utilizado como tratamento superficial do disco de serras.

3.2.1. Cromo Duro

A camada de Cromo Duro é produzida por eletrodeposição a partir de uma solução que contém ácido crómico (CrO_3) e um catalisador (por exemplo H_2SO_4) na mesma proporção. O depósito produzido apresenta uma dureza e resistência à corrosão elevadas.

Devido às suas excelentes propriedades de dureza e resistência ao desgaste, esta técnica é, normalmente, usada em aplicações onde uma elevada resistência ao desgaste é fundamental na melhoria da performance e da vida de uma ferramenta.

Part	Base metal	Thickness of plate		Plating time(a)
		μm	mils	
Computer printer type	Carbon steel	25	1	60 min
Face seals	Steel or copper	75-180	3-7	10 h
Aircraft engine parts	Nickel-based alloys, high strength steel	75-180	3-7	10 h
Plastic molds	Tool steel	5-13	0.2-0.5	30 min
Textile guides	Steel	5-100	0.2-4	20-240 min
Piston rings	Steel or cast iron	150-255	6-10	8 h
Balls for ball valves	Brass or steel	7.5-13	0.3-0.5	20 min
Micrometers	Steel	7.5-13	0.3-0.5	20 min
Golf ball molds	Brass or steel	7.5-25	0.3-1	20-60 min
Lock cases	Brass	5-7.5	0.2-0.3	20 min
Cylinder	Cast iron	255	10	300 min
Bushing	1018 carburized, 56 HRC	25	1	45 min
Crankshafts	Steel	255-3800	10-150	...
Cutting tools	Tool steel	1.3	0.05	5 min
Forming and drawing dies	Steel	25	1	60 min
Gage	Steel	125	5	150 min
Gun barrels, 30 caliber(b)	Steel	25	1	40 min
Hydraulic cylinder	1045 steel	13	0.5	40 min
Pin	Steel	13	0.5	30 min
Pin	1045 steel, 60 HRC	125	5	40 min
Plug gage	1040 steel, 55 HRC	125	5	150 min
Relief-valve plunger	1113 steel, soft	100	4	60 min
Ring gage	Steel	205	8	240 min
Rolls	Steel	13-255	0.5-10	20-300 min

(a) Times shown are for conventional plating solutions; plating times for the proprietary fluoride-free solution are half of those shown.
(b) M-16 rifle, barrel and chamber

Figura 3.3-Espessuras do revestimento de Cromo Duro consoante a aplicação [27].

Este processo pode ser dividido em dois tipos: por um lado, pode ser Cromo Duro Industrial ou Cromo Duro de Engenharia; por outro lado, pode ser Cromo Duro Decorativo. Este último é utilizado como um processo de acabamento para a decoração de superfícies [16].

O Cromo Duro Industrial difere do Cromo Duro Decorativo nos seguintes aspetos [27]:

- O Cromo Duro Industrial é indicado principalmente para aumentar a vida útil das peças em serviço, fornecendo uma superfície com um baixo coeficiente de desgaste que resiste ao desgaste abrasivo e à corrosão;
- O Cromo Duro Industrial é normalmente depositado para espessuras de 2,5 a 500 μm e para certas aplicações utilizam-se espessuras consideravelmente maiores, enquanto os revestimentos decorativos raramente excedem 1,3 μm ;
- Com algumas exceções, o Cromo Duro Industrial é aplicado diretamente sobre o metal base; o Cromo Duro Decorativo é aplicado sobre camadas de níquel ou de cobre e níquel.

A decisão pela utilização do Cromo Duro deve ter em conta aos seguintes aspetos:

- Espessura de depósito pretendido;
- Forma, tamanho e tipo de material que se pretende proteger;
- Dimensões pretendidas;
- Resistência ao desgaste e dureza inerentes ao processo.

É de notar que a dureza do depósito de Cromo Duro está diretamente relacionada com a condição de deposição, pois a espessura pode variar. De um modo geral, a deposição de crómio apresenta uma dureza cerca de 900 a 1000 HV [27].

As propriedades físicas do Cromo Duro estão representadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2-Propriedades físicas Cromo Duro-Adaptado de [28].

Número Atômico	24
Massa Atômica	52,01
Peso específico	6,9/7,1
Densidade	7000 kg/m ³
Ponto de fusão	1900 °C
Resistividade Elétrica	0,004 ohms/m
Condutividade Térmica	93W mK
Coefficiente de Dilatação Linear	0,8mm P.m a 0°C
Módulo de Elasticidade	1,03 GPa
Resistência à tração	1,03 MPa
Coefficiente de atrito estático (entre peça de aço e uma cromada)	0,17

Os defeitos decorrentes do Cromo Duro podem ser crescimentos dendríticos e acumulações excessivas de depósito, que podem ser minimizados com ferramentas e técnicas especiais.

Nem sempre é possível aplicar Cromo Duro, pelo que os casos seguintes não aceitam este tratamento superficial [28]:

- O Ferro fundido cinzento, devido à alta porosidade e teor de grafite;
- Metais com problemas na superfície (inclusões e porosidade);
- Metais com tratamento de nitretação, oxidação negra e fosfatização.

3.2.1.1. Eletrodeposição de Cromo Duro

O ácido crômico é a fonte de metal no banho de Cromo Duro. No entanto, uma solução de ácido crômico não deposita cromo se não contiver uma quantidade de catalisador na devida proporção já que, se a percentagem de catalisador for demasiado elevada ou demasiado baixa,

não haverá deposição de crómio [27]. Os catalisadores são normalmente ácidos na forma aniónica, por exemplo, ácido sulfúrico (H_2SO_4) [27].

Antes da eletrodeposição é necessário realizar a preparação e ativação da superfície a revestir. Esta preparação visa a obtenção de uma superfície isenta de óxidos, poros e pequenos defeitos superficiais. Assim, deve ser executada a limpeza da superfície por granalhagem, deixando-a perfeitamente limpa e desengordurada [29].

O banho de crómio é composto por anidrido crómico (Cr_2O_3) o qual, dissolvido em água, passando a ácido crómico, sendo posteriormente adicionado um catalisador, o ácido sulfúrico.

A peça é fixada ao polo negativo, o cátodo, onde ocorre a deposição do crómio metálico [27]. Por sua vez, no polo positivo fixam-se os ânodos insolúveis, onde ocorre a reconstituição do ácido crómico. Os ânodos, devido ao seu baixo poder de penetração e à grande variação das características físicas do depósito com a densidade de corrente, devem ser colocados a uma distância constante da peça a ser cromada de maneira a garantir a uniformidade do depósito. O processo de deposição inicia-se quando, mediante a passagem de corrente contínua, se promove a eletrólise da solução.

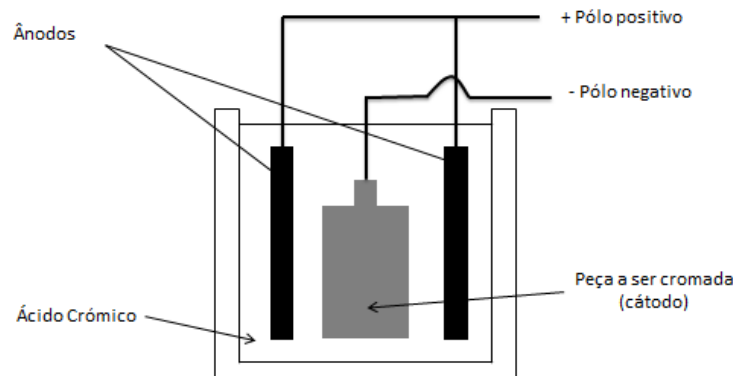
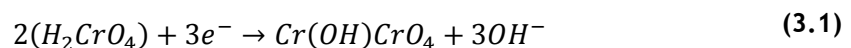


Figura 3.4-Eletrodeposição de crómio.

A reação química é dada pela seguinte equação [30]:



A molécula de ácido crómico, sob ação de corrente contínua, tem excesso de três elétrões, assim fortemente negativa, migra para o ânodo. Influenciada pelo catalisador, na superfície anódica forma-se a molécula complexa da segunda parte da equação referida anteriormente. O catalisador do banho, ácido sulfúrico na proporção de 1:100, penetra na camada catódica devido ao seu reduzido tamanho, atingindo a sua superfície. Em contacto com

o radical alcalino OH, dissolve-se permitindo a redução do ião de crómio em crómio metálico [31].

O Cromo Duro é aplicado diretamente sobre o metal base em camadas, pode ter aspeto brilhante ou mate, dependendo do tratamento prévio dado ao metal base antes da aplicação [32].

Segundo a *Galvanochrome*, existem 6 tipos de aplicação de cromagem [33]:

- **Cromo Duro de proteção**- Este processo é utilizado quando se pretende somente conferir a proteção contra a corrosão ou o desgaste, sem cumprimento de tolerâncias. Cada revestimento é determinado de acordo com o objetivo pretendido;

- **Cromo Duro por medida**- Tal como o nome indica, a camada cromática é depositada com uma espessura uniforme sobre a superfície da peça e aplanada de maneira a que, após a cromagem, cumpra os valores de tolerância e permita a sua montagem sem acabamentos mecânicos;

- **Cromo Duro espesso**- Aplicado principalmente em peças posteriormente sujeitas a acabamentos mecânicos. A camada cromática é depositada com uma espessura superior aos valores pretendidos e retificada de acordo com o pedido do cliente;

- **Cromo Duro mate**- Neste caso, as peças são estruturadas antes da cromagem dura. A estrutura da superfície pode ser mais ou menos trabalhada de acordo com a necessidade. Este tipo de cromagem dura é aplicada condicionalmente, uma vez que a estrutura original formação de picado;

- **Cromo Duro duplo**- Este tipo de cromagem dura é aplicada geralmente em peças sujeitas a temperaturas elevadas e a deformações durante o processo laboral (Ex: ferramenta de ponta larga com suporte fixo). Este método confere uma elevada resistência à corrosão e estas características adquirem-se através da aplicação de duas camadas de Cromo Duro diferenciadas em dureza e estrutura, e sobre a camada base mais macia é colocada uma segunda camada de Cromo Duro. Desta forma, elimina-se consideravelmente a possibilidade de formação de fendas na camada de Cromo Duro, fendas essas que ocorrem facilmente devido ao elevado coeficiente da dilatação do material base, quando sujeito a temperaturas elevadas;

- **Restauro de cromagens duras**- No caso do restauro de cromagens duras, trata-se da renovação de camadas de Cromo Duro desgastadas, de forma a prolongar claramente a durabilidade das peças. As peças são restauradas, respeitando exatamente as mesmas características do revestimento e devolvendo-lhes o seu estado original.

3.2.2. Cromo Duro Localizado

Segundo a empresa *Mbcromoduro*, este processo tem as mesmas características e especificações técnicas que o Cromo Duro normal, diferindo apenas no facto de ser possível aplicá-lo somente a determinadas partes da peça que necessitem de maior resistência ou que estejam danificadas [32].

3.2.3. Variação da espessura de Cromo Duro

As variações na espessura de Cromo Duro dependem principalmente da distribuição de corrente. Em zonas de canto e que contenham arestas vivas dar-se-á uma maior deposição de crómio do que em zonas interiores, como se observa na Figura 3.5.

A instabilidade em termos de espessura de depósito é a grande desvantagem desta técnica.

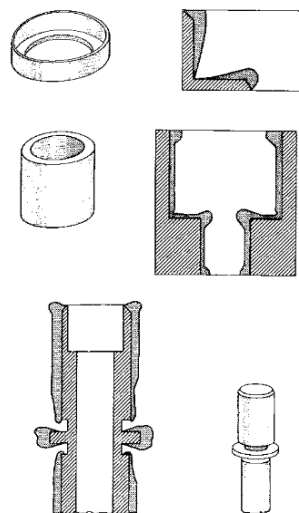


Figura 3.5-Espessuras não uniformes [27].

Nestes casos é necessário aplicar uma camada de depósito mais espessa para que assim se consiga cobrir toda a superfície da peça. Na maioria das vezes, é necessário retificar a peça pois existem zonas com camadas excessivas.

3.2.4. Custo

A eletrodeposição de Cromo Duro é uma técnica de revestimento que apresenta um alto rendimento, com depósitos de qualidade reprodutível que são inatingíveis por qualquer tecnologia alternativa. Os custos provêm essencialmente das despesas de capital e de trabalho,

seguida pela eletricidade e, por último, dos produtos químicos, que são relativamente baratos [27].

Os fatores que afetam o custo relativo da eletrodeposição, independentemente da solução utilizada, incluem a forma da peça, o desenho e arranjo dos ânodos, bem como técnicas de análise de acabamento especiais [27].

A mão-de-obra para cromagem dura pode ser maior do que para outros processos de revestimento, em grande parte porque muitas operações de cromagem são realizados manualmente [27].

O custo aumenta com a complexidade da peça a ser cromada.

3.2.5. Equipamento

De uma forma geral, um equipamento para processo de eletrodeposição é constituído por diversos acessórios, entre os quais [27]:

- Sistema de aquecimento e arrefecimento;
- Exaustor;
- Isolador;
- Fontes de alimentação;
- Extrator de fumos;
- Purificador;
- Ânodos de Chumbo
- Barramentos de Cobre;
- Ganchos.

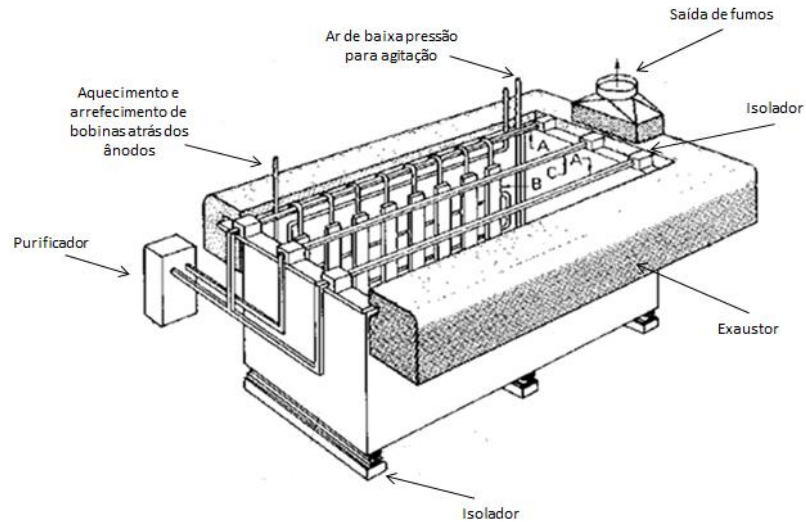


Figura 3.6-Tanque e equipamento utilizado para realizar Cromo Duro: A-Ânodos de Chumbo; B-Ganchos; C-Barramento de Cobre.

Os ânodos são confeccionados em Chumbo e o seu comprimento, geralmente é o mesmo dos tanques. A corrente elétrica passa pela peça através dos barramentos, e através dos ânodos de Chumbo para a reação química.

3.2.6. Deposição Química

A Deposição Química consiste na deposição de metais por meio de um processo de redução química. Por este processo é comum revestir-se com cobre e níquel. São os denominados cobre e níquel químicos, muito utilizados em peças com formato delicado e cheias de reentrâncias.

3.2.6.1. Níquel Químico

É um tipo especial de revestimento que aumenta a resistência à abrasão e corrosão e que não requer corrente elétrica, retificadores ou ânodos para que ocorra a deposição do metal.

A deposição da liga ocorre através da reação química ou auto-catalítica entre os agentes dissolvidos (Sulfato de Níquel + Hipofosfito de Sódio) em solução aquosa onde a peça é mergulhada, daí o nome Níquel Químico ou auto-catalítico [29].

A espessura é uniforme e independente da geometria da peça, além de alta resistência à corrosão e ao desgaste, possui alta dureza e lubricidade natural. Os revestimentos em níquel químico (EN) são extremamente funcionais, sendo úteis para diversas aplicações nas indústrias.

O Níquel Químico deposita-se sobre qualquer metal ferroso ou não ferroso, inclusive metais tratados termicamente e nitretados.

A nível de dureza, apresenta uma elevada dureza superficial, como referido anteriormente, podendo atingir até 69 HRC.

Existem diversos tipos de Níquel Químico, entre os quais [34]:

- **Níquel baixo fósforo (2-4% de Fósforo)**

Um banho que proporciona depósitos superiores a 60 HRC, com valores aproximados ao do Cromo Duro, no entanto com a vantagem na uniformidade da camada em peças complexas.

O níquel baixo fósforo apresenta excelente resistência à corrosão para condições alcalinas.

- **Níquel médio fósforo (5-9% de Fósforo)**

Este é mais indicado para peças que serão submetidas ao desgaste, pelo que apresenta melhor desempenho em condições de desgaste abrasivo.

Peças revestidas com níquel químico com teor médio de fósforo, apresentam um desempenho similar ao do aço inox, alto brilho e possuem dureza de 45 HRC, podendo ser aumentada para 68 HRC quando submetida a um tratamento térmico (Figura 3.7).

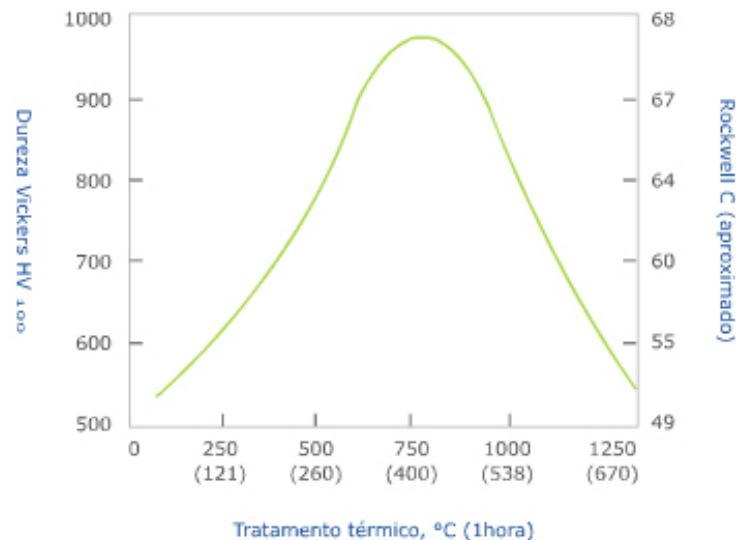


Figura 3.7-Gráfico que representa a relação de dureza com a temperatura de tratamento térmico [34].

- **Níquel alto fósforo (9-13% de Fósforo)**

Este tipo de acabamento proporciona a máxima resistência à corrosão. O níquel com alto teor em fósforo é o padrão nas indústrias que requerem proteção para ambientes altamente corrosivos e ácidos. Apresenta um elevado grau de soldabilidade.

Algumas vantagens do Níquel Químico são [27]:

- Boa resistência ao desgaste e corrosão;
- Excelente uniformidade;
- Boa soldabilidade e brasabilidade;
- Baixo custo de trabalho.

Por sua vez, apresenta as seguintes limitações:

- Custos químicos mais elevados do que na eletrodeposição;
- Fragilidade;
- Taxa de deposição lenta, em comparação com métodos eletrolíticos.

3.2.7. Deposição em fase de vapor (PVD)

Desde 1980 que os revestimentos de ferramentas através de PVD começaram a surgir, e a indústria evoluiu, desde então, em torno deste método de deposição [35].

O processo PVD é usado extensivamente em comparação com outras técnicas de revestimento. Consiste numa técnica de revestimento por atomização ou vaporização de material a partir de uma fonte sólida e a deposição desse material sobre o material de base para formar o revestimento, implicando a transferência de material a nível atômico. É um processo alternativo para a eletrodeposição.

As vantagens deste processo são a possibilidade de depositar compostos de liga, com composições de estrutura multicamada e a capacidade de variar as características do revestimento com gradação funcional [36].

O processo PVD é feito sob alto vácuo a temperaturas que variam na ordem de 150 °C e 500 °C. É semelhante ao processo de deposição de vapor químico (CVD), exceto que as matérias-primas/precursores (ou seja, o material que irá ser depositado) encontram-se na forma sólida, enquanto no caso da técnica CVD as matérias precursoras são introduzidas na câmara de reação no estado gasoso.

O processo PVD compreende as seguintes fases [19]:

- **Evaporação:** durante esta fase, um alvo, consistindo no material a ser depositado, é bombardeado com um feixe de elevada energia de elétrons ou iões. Esta técnica desaloja átomos da superfície do alvo, “vaporizando-os”;
- **Transporte:** este processo consiste simplesmente em movimentar os átomos “vaporizados” desde o alvo até ao substrato a revestir e é, regra geral, um processo muito simples;
- **Reação:** quando os revestimentos consistem em óxidos metálicos, nitretos, carbonetos e outros materiais equivalentes, o alvo é feito de metal. Os átomos de metal reagem com o gás apropriado durante a fase de transporte;
- **Deposição:** este é o processo de acumulação de revestimento na superfície do substrato.

Os revestimentos depositados pelo processo PVD são utilizados por diversas razões, entre as quais [19]:

- Rigidez melhorada e resistência ao desgaste;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Maior resistência à oxidação.
- Não existem emissões, nem materiais nocivos ao meio ambiente;

- Temperatura do revestimento abaixo da temperatura de tratamento térmico final da maioria dos aços;
- Espessura do revestimento pequena, podendo ser reproduzida com precisão (para repetição precisa na superfície, adequação ao tamanho);
- Elevada resistência ao desgaste [19].

Existem várias soluções dentro do processo PVD, tendo como principal diferença a forma como as partículas são aceleradas a partir do alvo em direção ao substrato. Assim, como se pode verificar na Figura 3.8, este processo assume duas formas principais: a evaporação e a projeção catódica (*Sputtering*).

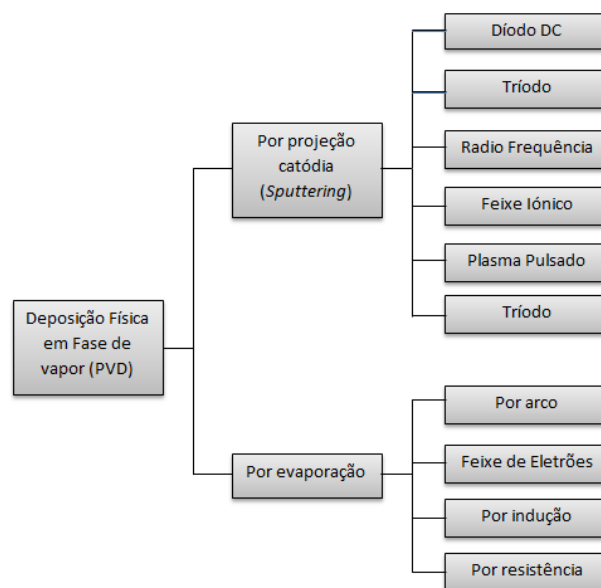


Figura 3.8-Diagrama esquemático de algumas variantes desenvolvidas com base na técnica de deposição PVD-Adaptado de [24].

3.2.8. Equipamentos para PVD

Hoje em dia, existem quatro tipos básicos de equipamentos para deposição de revestimentos de ferramentas pelo processo PVD, enquadrando-se todos na categoria de metalização iônica. A diferença entre eles reside na forma como o material é vaporizado (ou por evaporação ou projeção catódica); o modo como o plasma é criado; e o número e tipos de íons e eletrões que constituem o plasma [35].

3.2.9. TiN, TiAlN, ZrN, TiCN e CrN

Existem três revestimentos primários de ferramentas por PVD: Nitreto de Titânio (TiN), Carbonitreto de Titânio (TiCN) e Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN). Adicionalmente, existem outros revestimentos, tais como o Nitreto de Zircônio (ZrN), *Diamond Like Carbon* (DLC), Nitreto de Crômio (CrN) e filmes de metal-carbono, que também são usados para algumas aplicações [35]. Na Tabela 3.3 estão apresentadas várias propriedades de alguns dos revestimentos anteriormente referidos.

Tabela 3.3-Propriedades dos revestimentos metálicos-Adaptado de [37].

Revestimentos	Microdureza ⁴ (HV0,05)	Coefficiente de atrito (seco)	Temperatura de oxidação (°C)	Espessura (µm)	Cor
Nitreto de titânio (TiN)	2300±400	0,65-0,7	500±50	2-4	ouro- amarelo
Nitreto de Crômio (CrN)	1750±300	0,5-0,6	700±50	2-6+	prata- cinzento
Carbonitreto de Titânio (TiCN)	3000±300	0,45-0,6	400±50	2-5	azul-cinzento
Nitreto de Zircônio (ZrN)	2500±300	0,65-0,7	450±50	2-3	dourado claro
Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN)	3300±500	0,4-0,55	800±50	2-3	violeta- cinzento

Nos últimos anos, os revestimentos de TiAlN, obtidos através da técnica de PVD, foram amplamente aplicados para melhorar a vida e o desempenho de uma ampla variedade de materiais para ferramentas, devido às suas propriedades de alta dureza, boa resistência ao desgaste e boa estabilidade química [38].

O revestimento de TiAlN (Nitreto de Titânio-Alumínio) constitui uma barreira térmica à progressão do calor através da ferramenta. Outra propriedade deste revestimento é a sua

⁴ Depende das aplicações e das condições de ensaio

resistência à abrasão. Por estas razões, este revestimento é o indicado para maquinagem a seco [38].

Recentemente, um novo nitreto ternário-AlCrN- com maior percentagem de alumínio, tem despertado interesse devido às suas excelentes propriedades, nomeadamente sob condições de temperatura elevada [38].

Portanto, a substituição de titânio pelo cromo é desejada, pois permite aumentar ainda mais a percentagem de alumínio.

O AlCrN e TiAlN são dois tipos de revestimentos primários disponíveis comercialmente [38].

3.2.10. AlCrN-ALCRONA

O ALCRONA, nome comercial (empresa *Oerlikon Balzers*, Portugal) de AlCrN, é um revestimento de alto rendimento, isento de titânio e que faz parte da nova e revolucionária geração de revestimentos. É excelente para níveis de resistência à oxidação e dureza a quente, que nunca haviam sido antes atingidos. Estas propriedades conferem a este revestimento uma incomparável resistência ao desgaste, tanto em condições normais como sob esforços mecânicos elevados [39].

O revestimento ALCRONA aumenta a capacidade de corte da ferramenta e melhora a vida útil da ferramenta, mesmo sob condições de corte adversas [36].

A sua elevada dureza a quente resulta numa excelente resistência à abrasão, mesmo a altas velocidades de corte. No gráfico apresentado na Figura 3.9 é comparada a dureza a quente do ALCRONA com outros revestimentos à base de Titânio vulgarmente utilizados [36].

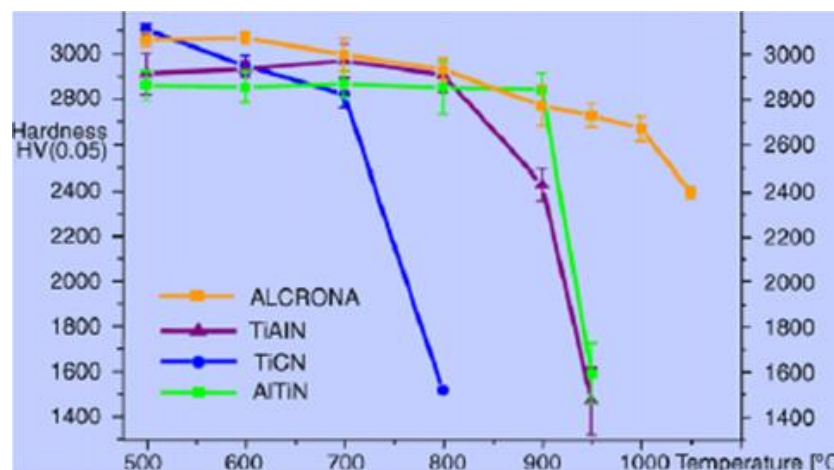


Figura 3.9-Dureza a quente do ALCRONA e comparação com revestimentos à base de Titânio- Adaptado de [36].

É visível no gráfico da Figura 3.9 que o revestimento ALCRONA apresenta maior dureza a quente em comparação com os restantes revestimentos testados.

O revestimento de ALCRONA aumenta a vida útil da ferramenta, pois apresenta maior resistência à oxidação, proporcionando uma melhor estabilidade química e capacidade de resistir a temperaturas até 1100 °C [36].

Os mecanismos de oxidação de revestimentos de AlCrN têm sido extensivamente estudados na literatura [40]. Está documentado que os revestimentos de AlCrN apresentam elevada resistência à oxidação a curto prazo até 1100°C, devido à formação de Óxidos de Cr-Al que apresentam impedem a difusão [40].

De uma forma resumida, apresentam-se as propriedades deste revestimento na Tabela 3.4.

Tabela 3.4-Propriedades do revestimento AlCrN-ALCRONA [39].

Propriedades do revestimento	
Material do revestimento	AlCrN
Microdureza (HV 0.05)	3200
Coefficiente de atrito no aço (seco)	0,35
Temperatura máxima de serviço (°C)	1100
Cor do revestimento	Cinzento brilhante

É de notar que a microdureza, bem como o coeficiente de atrito, dependem das aplicações e das condições de ensaio.

3.3. Revestimentos de conversão

Um revestimento de conversão é um tratamento de superfície que oferece resistência à corrosão e resistência ao desgaste. Estes revestimentos são alcançados por processos químicos ou eletroquímicos que fisicamente convertem os componentes da superfície do metal para o acabamento desejado. Estes processos de conversão utilizam óxido, fosfato, e cromato [41].

Conversões de óxido são usadas em vários metais como revestimentos decorativos e resistentes à corrosão. Conversões de fosfato e cromato oferecem acabamentos mais especializados, melhoram a resistência ao desgaste, e servem como elementos condutores [41].

O revestimento de conversão de óxido é normalmente aplicado às ligas de ferro, tais como aço, embora seja por vezes utilizado em cobre e latão. Estes revestimentos apresentam resistência à corrosão, qualidades decorativas, estabilidade dimensional, e, em alguns casos, uma camada recetiva para as tintas [41].

A oxidação negra é um exemplo de revestimento de conversão, que pode ser utilizado em discos de serras circulares.

3.3.1. Oxidação Negra

É uma técnica implementada na FREZITE, tendo como objetivo atribuir às ferramentas essencialmente, um melhor acabamento decorativo.

A oxidação negra é considerada um revestimento de conversão para materiais ferrosos, cobre e ligas de cobre, zinco e materiais sinterizados, que se forma através da reação química que se inicia quando os componentes estão imersos numa solução de sais alcalinos a uma temperatura de aproximadamente 140 °C [29]. É um revestimento empregue em discos de serras circulares [29].

Normalmente impregna-se a camada de óxido com óleo, cera ou verniz, de maneira a melhorar a resistência à corrosão.

Nos materiais ferrosos, normalmente aços de baixa liga, a reação resultante entre o ferro da superfície da peça e o banho de oxidação negra a quente produz magnetite (Fe_3O_4) na superfície do componente. A camada de magnetite impede a formação de óxido vermelho, Fe_2O_3 , conhecido como ferrugem [29].

Esta técnica também pode ser aplicada em materiais não ferrosos, sob condições específicas para formar a camada de oxidação, mas não pode ser aplicada sobre materiais que já tenham sido revestidos com zinco, níquel, cromo, cádmio e fósforo [29].

Existe a possibilidade de se aplicar o processo a temperatura ambiente, no entanto, não se obtêm todos os benefícios em relação ao processo a quente. O processo de oxidação a frio apresenta uma variação de tonalidade de secção para secção e resistência à corrosão e abrasão inferiores à oxidação a quente [42].



Figura 3.10-Exemplos de peças que sofreram oxidação negra [42].

Existem algumas especificações para a oxidação negra, onde se destaca a MIL-DTL-13924, que abrange quatro classes de processos para diferentes substratos.

Este tipo de revestimento apresenta uma pequena espessura de camada de óxido formada e baixo custo [42].

As vantagens do processo de oxidação negra são: a imutabilidade das dimensões do componente; o depósito ser removido apenas mecanicamente ou quimicamente; a possibilidade de obtenção de diferentes tonalidades através de revestimento suplementar, a tonalidade negra, característica do banho de oxidação, suporta temperaturas até 480 °C; e soldadura sem produção de fumos nocivos [42].

A sequência industrial do processo é dividida em cinco etapas, como representado na Figura 3.11.



Figura 3.11-Sequência industrial do processo de oxidação negra.

Normalmente usa-se como revestimento suplementar um óleo, sendo o processo denominado oxidação negra a óleo. Recomenda-se que se aplique um revestimento suplementar, dado que a oxidação negra sem a sua aplicação apresenta uma baixa resistência à corrosão, contudo, com o uso de óleo é possível obter-se uma resistência à corrosão

considerável em atmosferas inertes. Para além do óleo, também pode usar-se cera ou verniz [29].

Para determinar o revestimento suplementar apropriado, devem ter-se em consideração os seguintes aspetos [29]:

- Espessura de proteção exigida;
- Aparência pretendida para o componente, ou seja, brilhante ou fosco;
- Condições em que vai ser aplicada a peça.

Como o banho produz um efluente que necessita de tratamento, a FREZITE possui uma ETAR onde se realizam três processos, entre os quais, redução, neutralização e filtração.

A redução de nitritos é feita no primeiro tanque de tratamento, com agitação e pH controlado, sendo este mantido abaixo de um valor de *set-point* definido no controlador por dosagem de ácido sulfúrico. A neutralização processa-se no segundo tanque de tratamento com agitação e pH controlado, doseando-se soda cáustica sempre que o valor do pH respetivo desce abaixo do valor que é definido como *set-point* de trabalho no controlador de pH.

Após a neutralização, o efluente é conduzido para um tanque de reenvio a uma coluna filtrante com carga de Quartzite. Por sua vez, a água filtrada é conduzida a uma caixa de descarga.

Os ensaios realizados ao depósito de forma a verificar a sua conformidade são o teste visual e o teste da humidade, sendo este realizado de acordo com a norma ASTM D 2247, de maneira a determinar a resistência do depósito na água, num ambiente de 100% de humidade. [29]. No primeiro caso, a camada de oxidação deve abranger toda a superfície da peça de forma uniforme e de tonalidade escura (preto). A peça não deve apresentar qualquer sinal de corrosão ou ataque intergranular [29].

Capítulo 4

Técnicas de caracterização estrutural de revestimentos

As propriedades mecânicas dos revestimentos podem ser avaliadas, fundamentalmente, a partir de ensaios de dureza, de aderência e de desgaste [43].

Os quatro fatores principais que influenciam o comportamento tribológico são: a dureza do revestimento e do material de base/substrato; a espessura do revestimento; a rugosidade da superfície; e o tamanho e dureza de quaisquer detritos no contacto (que possam existir ou ser gerados durante o serviço). Dependendo destes fatores, pode ocorrer uma gama de fenómenos variável [44].

Assim sendo, este será o último capítulo da revisão bibliográfica. Aqui abordam-se as técnicas de caracterização estrutural de revestimentos, ou seja, as técnicas de análise utilizadas para caracterizar os revestimentos.

4.1. Caracterização das superfícies

4.1.1. Rugosidade

As superfícies apresentam irregularidades, que podem ser classificadas em: desvios macrogeométricos (desvios de retitude, de planeza, ondulação, etc.); e desvios microgeométricos (rugosidade) [45].

Assim, o estado da superfície é o resultado de desvios repetitivos ou aleatórios, em relação à superfície geométrica, que formam a topografia tridimensional de uma superfície, da qual faz parte a rugosidade, a ondulação, a orientação das irregularidades, as imperfeições e os desvios de forma numa zona limitada da superfície [45] [46].

O método de medição dos estados da superfície mais utilizado é a exploração do perfil de superfície, ampliado e com anamorfose (a ampliação vertical é maior do que a ampliação horizontal), num plano normal à superfície considerada.

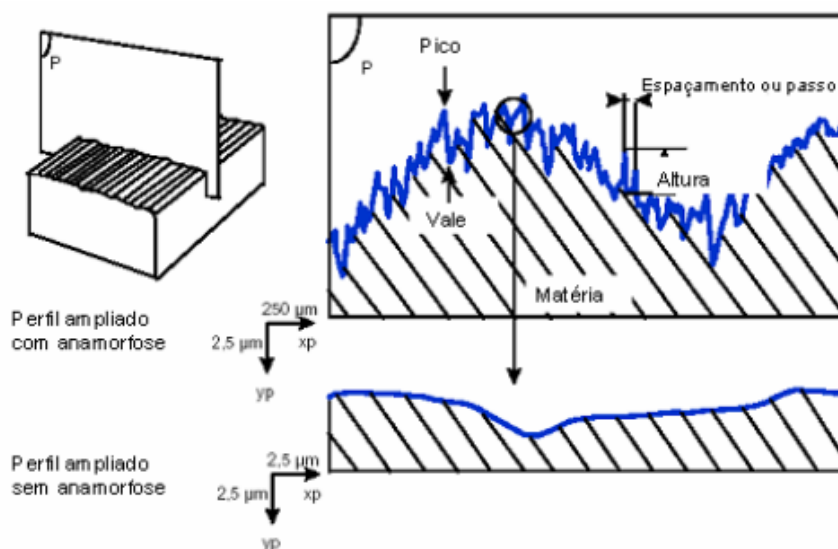


Figura 4.1-Representação das irregularidades num perfil do estado de superfície [45] [46].

O perfil de superfície apresenta uma sucessão de picos separados por vales (irregularidades geométricas do perfil), que poderá ser constatado na seguinte figura.

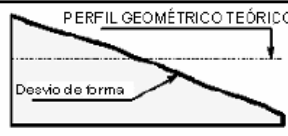
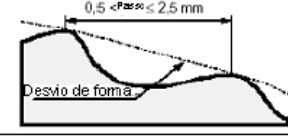
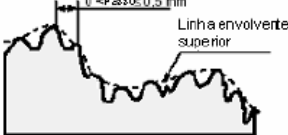

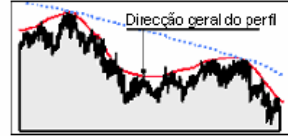
N.º de ordem	TIPO DE IRREGULARIDADES	ESBOÇO
1	DESVIOS DE FORMA: Desvios de rectitude de planeza de circularidade de cilíndricidade etc.	
2	ONDULAÇÃO Irregularidades geométricas tais que a distância entre dois dos seus topos esteja compreendida entre dois limites (ex.: 0,5 a 2,5 mm).	
3	RUGOSIDADE Irregularidades geométricas tais que a distância entre dois dos seus picos esteja compreendida entre 0 e, por exemplo, 0,5 mm.	
4	ARRANCAMENTO Marca de ferramenta, fenda, picagem.	
	PERFIL TOTAL (Soma dos desvios)	

Figura 4.2-Tipologias dos desvios (irregularidades).

4.1.2. Meios de avaliação dos estados de superfície

Com os rugosímetros, a separação das diferentes irregularidades geométricas de perfil (perfil primário, perfil de ondulação e perfil de rugosidade) faz-se por intermédio de uma filtragem eletrónica, embora uma adequada escolha da extremidade (raio) do apalpador seja também um aspeto importante para a aquisição de dados relativos ao perfil (filtragem mecânica).

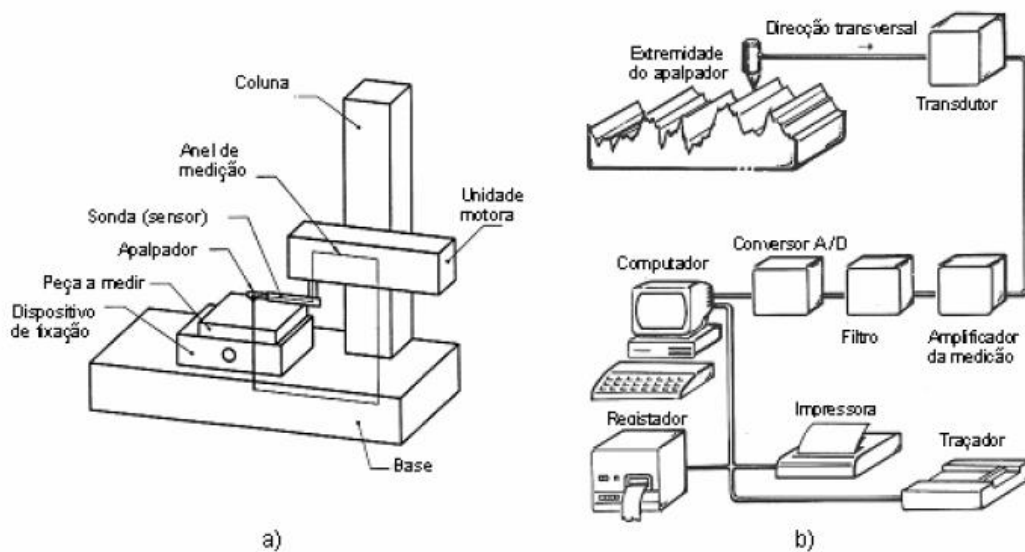


Figura 4.3-Instrumento de apalpador: (a) rugosímetro ou (b) perfilómetro de contacto.

4.1.3. A importância dos estados de superfície

A rugosidade pode ter influência em funcionalidades tais como:

- A qualidade do deslizamento (atrito seco e viscoso);
- A resistência à corrosão e ao desgaste;
- A resistência oferecida ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- A qualidade da aderência de revestimentos;
- A resistência à flexão e à fadiga;
- A condução térmica e elétrica;
- A aparência estética.

4.1.4. Parâmetros caracterizadores do estado da superfície (rugosidade)

- **Ra (rugosidade média aritmética do perfil de rugosidade)**

Ra, também designado por rugosidade média aritmética, é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$ no interior de um comprimento de base L_r , (ISO 4287) [45].

$$R_a = \frac{1}{L_r} \int |Z(x)| dx \quad (4.1)$$

Na prática e por omissão, os valores de Ra são determinados no interior de um comprimento de avaliação $L_n=5L_r$ [45].

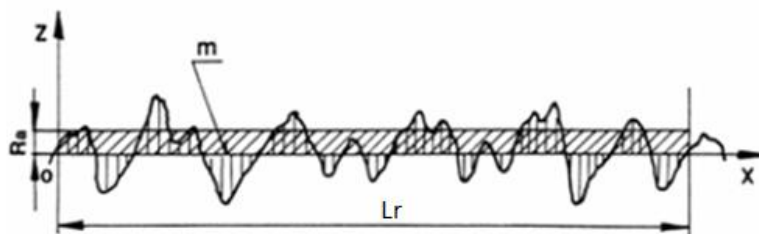


Figura 4.4-Desvio médio aritmético (Ra) [45] [46].

Por definição, Ra não permite diferenciar os perfis inversos, relativamente à linha média (eixo dos xx), e, portanto, não fornece nenhuma informação sobre a robustez ou fragilidade de um perfil, nem sobre a aptidão das peças para exercerem convenientemente a função para que foram projetadas [45].

O parâmetro Ra é o mais utilizado, fundamentalmente, nos seguintes casos [45]:

- no controlo de um processo produtivo onde podem ocorrer mudanças graduais no acabamento superficial, resultantes do desgaste da ferramenta de corte;
- em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos das operações de maquinar bem orientados (torneamento, fresagem, etc.);
- em superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins estéticos.

- **Rz (Média aritmética das alturas máximas do perfil de rugosidade)**

Rz (DIN 4768) é a média aritmética das alturas máximas do perfil Zi (iguais a Rz, ISO 4287), medidas em cinco comprimentos de base consecutivos. A maior das alturas máximas de perfil Zi, verificado no interior do comprimento de avaliação Lm, designa-se por Rmax.

$$Rz = 1 / 5 (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)$$

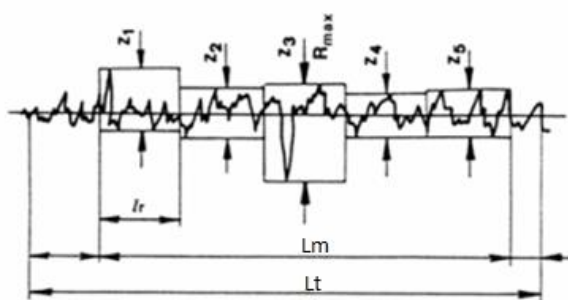


Figura 4.5-Média aritméticas das alturas máximas do perfil de rugosidade-Rz (DIN) [45] [46].

Rz (DIN) é geralmente mais sensível às mudanças no acabamento superficial do que Ra, sendo um critério útil no controlo de um processo produtivo.

Do conjunto de parâmetros fornecidos pelo rugosímetro são normalmente seleccionados a rugosidade média aritmética, Ra e a média aritmética das alturas máximas do perfil de rugosidade, Rz [17].

Para evitar o contacto do apalpador do rugosímetro com a superfície revestida, foram desenvolvidas técnicas de interferometria, acompanhadas do respetivo suporte eletrónico, que

permitem a avaliação conveniente da superfície sem que se corram riscos de alteração das geometrias da superfície, por contacto com o referido apalpador, como é exemplo o Microscópio Ótico Industrial 3D [17] [21].

4.2. Espessura do revestimento

A espessura do revestimento é um fator que assume particular importância, quando se caracteriza uma dada superfície. Tem influência a nível da tensão instalada no revestimento e na sua interface, bem como na dureza da superfície e o grau de adesão do revestimento ao substrato.

A medição da espessura de revestimento, que é normalmente muito fina, pode ser efetuada com recurso a uma grande variedade de técnicas, entre as quais as apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1-Métodos de medição da espessura de revestimento [17].

Método de medição	
Métodos Óticos	<ul style="list-style-type: none"> • Metalografia • SEM • Holografia
Métodos de Remoção	<ul style="list-style-type: none"> • Elétrica • Transdutor de folgas
Métodos Eletromagnéticos	<ul style="list-style-type: none"> • Fluxo magnético • Corrente de Eddy • Capacitância
Métodos de Difusão	<ul style="list-style-type: none"> • Ultra-sons • Retrodifusão beta
Métodos de Excitação	<ul style="list-style-type: none"> • Raios X

Neste trabalho, para medir a espessura dos revestimentos utilizaram-se métodos óticos, como a microscopia ótica e a microscopia eletrónica de varrimento (SEM).

4.2.1. Determinação da espessura do revestimento usando ensaio de desgaste por esfera rotativa

Através do ensaio de desgaste por esfera rotativa também é possível fazer a medição da espessura do revestimento. Nesta técnica de aferição, é feita a penetração no substrato do revestimento com uma esfera de aço. A calote resultante é medida, sendo os resultados obtidos utilizados para calcular a espessura do revestimento [47].

A espessura do revestimento, t , utilizado na análise para as taxas de desgaste deve ser calculada a partir da medição de crateras adicionais (de preferência três ou mais distribuídas ao longo da superfície da amostra em teste), usando um abrasivo de diamante com um tamanho de partícula de $1\mu\text{m}$ ou menos. Este ensaio, que será explicado em 4.4.1., é realizado segundo a norma EN 1071-2.

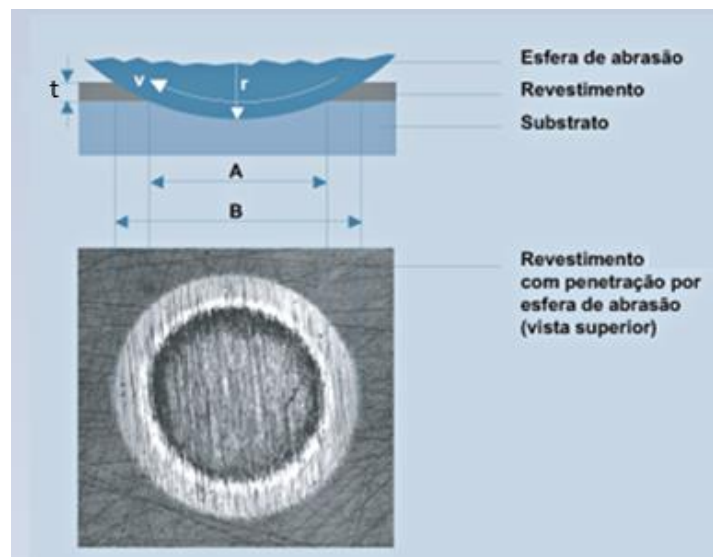


Figura 4.6-Aferição da espessura do revestimento do ensaio de abrasão esférica-Adaptado de [47].

Considerando B como o diâmetro total da cratera, A o diâmetro da cratera no substrato e r o raio da esfera de aço, t , espessura do revestimento, é dada por:

$$t = \left(r^2 - \left(\frac{B}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left(R - \left(\frac{A}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

4.3. Análise das propriedades mecânicas

4.3.1. Dureza

A dureza é uma medida da resistência de um material metálico à deformação permanente (plástica). A dureza de um material metálico é medida forçando um indentador a penetrar na superfície da amostra [48].

O indentador, que é geralmente uma esfera, uma pirâmide ou um cone, é feito de um material muito mais duro do que o material a ser ensaiado [48].

Os quatro tipos de ensaio de dureza mais habituais são: Brinell, Vickers, Knoop e Rockwell [48].

Para a medição de dureza das superfícies revestidas utilizam-se de uma forma geral penetradores Vickers ou Knoop, com cargas de ensaio pequenas, entre as 10g e 500g [17].

Na medição de revestimentos muito finos, por vezes, há que recorrer a técnicas adequadas de medição, como é o caso da nanoindentação.

4.3.1.1. Ensaio Vickers

Este ensaio utiliza um penetrador de diamante com forma de uma pirâmide quadrangular e com um ângulo entre faces de 136°. O valor da dureza Vickers é proporcional ao quociente da força de ensaio (F_e) em kgf pela área lateral da impressão (A_e) em mm^2 [49].

A dureza Vickers é expressa pela equação [49]:

$$HV = \frac{1}{g} \frac{F_e}{A_e} \quad (N / \text{mm}^2) \quad (4.3)$$

Onde, g é a aceleração da gravidade em m/s^2 .

As diagonais de uma impressão feitas pelo instrumento de teste numa carga definida são aferidas com um microscópio ótico [49].

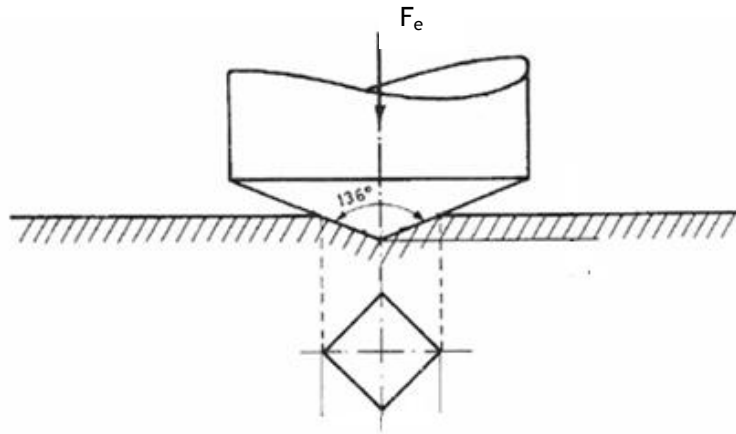


Figura 4.7-Geometria da indentação no ensaio Vickers-Adaptado de [50].

Segundo a norma NP 711-1:1990, a dureza Vickers é designada pelo símbolo HV precedido do valor da dureza, e seguido, de um número que indica a força de ensaio expressa em kgf (Tabela 4.2) [49].

Tabela 4.2-Relação símbolo da dureza/força de ensaio nominal segundo a norma NP 711-1:1990 [49].

Símbolo de Dureza	Força de Ensaio Nominal (N)
HV 5	49,03
HV 10	98,07
HV 20	196,1
HV 30	294,2
HV 50	490,30
HV 100	980,7

4.3.2. Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza é utilizado tanto para a medição da espessura de camadas endurecidas como para a determinação da dureza de microconstituintes ou de peças de dimensões extremamente reduzidas. A microdureza utiliza normalmente uma força de ensaio, F_e , entre 0,098 N (10gf) e 9,8 N (1000gf), através de um penetrador de diamante que produz uma impressão microscópica na superfície do material [49].

A microdureza Vickers utiliza a mesma técnica descrita no ensaio de dureza Vickers. A relação entre a diagonal maior e a diagonal menor é de 7:1. O valor do número de dureza obtém-se pelo quociente entre a força de ensaio (F_e) e a área da impressão projetada (A_e), ou seja [49]:

$$HK = \frac{1}{g} \frac{F_e}{A_e} \quad (N/mm^2) \quad (4.4)$$

onde, g é a aceleração da gravidade em m/s^2 .

4.3.3. Ensaio Rockwell

No ensaio Rockwell, o número da dureza está relacionado de forma direta com a profundidade de indentação. Neste ensaio, cada unidade de variação corresponde a um deslocamento perpendicular à superfície do indentador de 0,002mm. O ensaio de Rockwell apresenta várias escalas, obtidas pela combinação de diferentes forças com diferentes penetradores. Destas escalas, as mais utilizadas na indústria são a Rockwell-B (HRB) e a Rockwell-C (HRC).

O método de Rockwell difere dos outros pelo facto de utilizar duas cargas durante o ensaio.

Uma carga inicial (F_0) é aplicada sobre a amostra, que garante um contacto firme do indentador com a superfície daquela amostra, eliminando a interferência de pequenos defeitos de superfície e defeitos mecânicos do próprio equipamento de medida, obtidas pela combinação de diferentes cargas com diferentes indentadores. Considera-se que neste momento a penetração é zero [51]. A segunda carga aplicada (F_1) é maior que a inicial, originando uma força total F . Por fim, na terceira fase do ensaio, após manter a força total (F) durante um determinado intervalo de tempo, retira-se a carga F_1 , verificando-se uma recuperação elástica do material, levando a uma subida do indentador [51]. No final da recuperação elástica (instantânea) lê-se o valor de dureza na escala Rockwell apropriada [51]. O princípio está ilustrado na Figura 4.8.

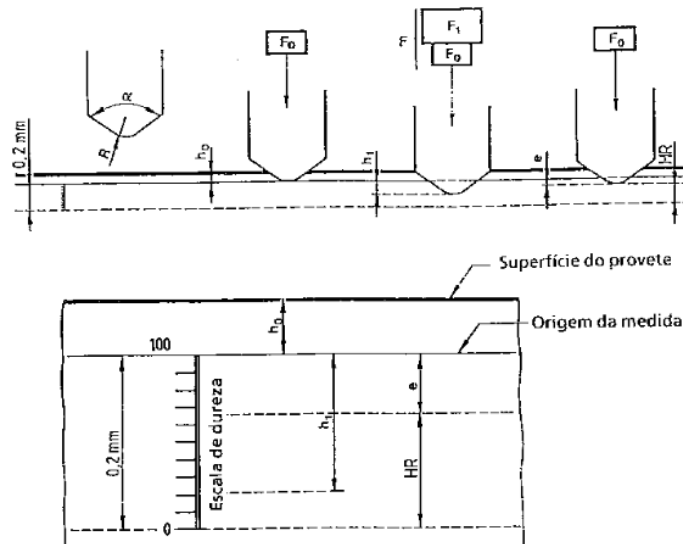


Figura 4.8-Princípio do ensaio Rockwell, com penetrador conde de diamante, segundo a norma NP 141:1990 [49].

Na escala C o penetrador cônico de diamante, com 120° de abertura e ponta arredondada com 0,2mm de raio, é solicitado por uma força inicial (F_0) de 98,07 N (10kgf) e por uma força adicional (F_1) de 1373 N (140kgf). A escala C é usada para metais e ligas mais duras como, por exemplo, aços temperados [49].

4.3.4. Adesão do revestimento ao substrato

A adesão é uma característica importante quando se avaliam as propriedades de uma superfície revestida. Se existir uma fraca adesão do revestimento ao substrato, o revestimento não desempenha a função pretendida, alterando significativamente o comportamento tribológico da superfície.

Segundo a Sociedade Americana para Testes de Materiais (ASTM D 907-70), a adesão é “o estado no qual duas superfícies estão ligadas através de forças interfaciais que podem por sua vez serem constituídas por forças de valência ou forças interligantes ou ainda de ambas” [44]. Estas forças de ligação podem ser de tipo de *Van der Waals*, eletrostáticas e/ou forças de ligação química.

Contudo, nem sempre a adesão está relacionada com a energia de ligação; existem fatores, como defeitos existentes na estrutura ou tensões internas instaladas, que podem influenciar a adesão do revestimento ao substrato [17].

Para avaliar a adesão do revestimento ao substrato recorre-se a vários tipos de ensaios, entre os quais o *Scratch-Test* [17], que será explicado de seguida.

4.3.4.1. Indentação deslizante- *Scratch-Test*

Scratch-Test é uma técnica utilizada para avaliar a aderência do revestimento (normalmente depositado por PVD) ao substrato, sendo designada por indentação deslizante. Este método qualitativo consiste na aplicação de uma força (F) à amostra fixada numa mesa que se desloca com uma velocidade pré-estabelecida segundo a direção do risco, ocorrendo falhas sucessivas com o aumento da respetiva carga aplicada (Figura 4.9) [48].

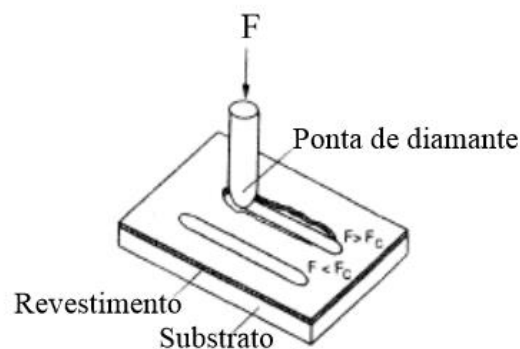


Figura 4.9- Diagrama de um “*Scratch-Test*” onde F designa a carga aplicada e F_c a carga crítica correspondente à perda de adesão na interface do revestimento com o substrato [52].

Aplica-se uma força constante para verificar a homogeneidade do revestimento ao longo do percurso podendo também verificar-se a ocorrência, ao longo do percurso medido, de pontos onde ocorre a descolagem do revestimento.

Com a aplicação de uma força variável e crescente sobre a superfície do revestimento ocorre a rutura do filme, verificando-se o início de falha de adesão. Esta falha dá-se para uma carga específica, a carga crítica.

Durante o teste são emitidas ondas acústicas elásticas resultantes da libertação de energia no instante das falhas de aderência. Posteriormente a intensidade do sinal é integrada em relação ao tempo e transformada de imediato num espectro de energia, possibilitando a identificação do mecanismo que provoca a falha de aderência.

As falhas de aderência dividem-se entre as de natureza coesiva e as de natureza adesiva.

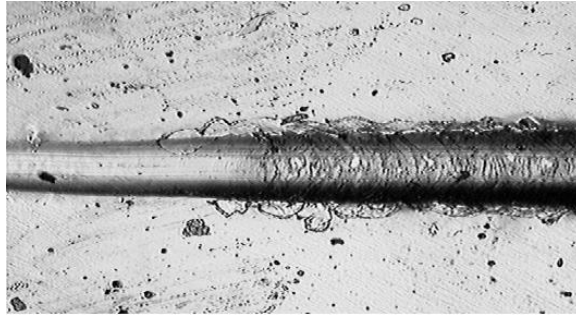


Figura 4.10-Exemplo do indentação do *Scratch-Test* [53].

4.3.4.2. Verificação da adesão do revestimento ao substrato através de teste de indentação Rockwell

Outra técnica utilizada para verificar a aderência do revestimento é a realização de um teste convencional de dureza Rockwell, sendo a área de fissuras e escamas do revestimento ao redor das extremidades do entalhe analisada com um microscópio ótico. Este método é utilizado normalmente para revestimentos que utilizam a técnica de deposição PVD.

O teste de indentação Rockwell C, ou também chamado de Daimler-Benz, é um método desenvolvido pela “*Union of German Engineers*” (*Verein Deutscher Ingenieure, VDI*) para a avaliação de revestimentos finos, segundo a diretriz 3198 (1991). O teste consiste em usar um indentedor Rockwell-C para efetuar uma indentação com cargas pré-definidas. A indentação gerada provoca falhas na camada adjacente à impressão, que podem ser analisadas ao microscópio ótico com uma ampliação de 100:1 e comparadas com impressões padrão de qualidade de adesão pré-definidos.

O princípio deste método está apresentado na Figura 4.11. Um diamante cônico penetra na superfície de um composto revestido, induzindo assim uma deformação plástica ao substrato, ocorrendo a fratura do revestimento [54].

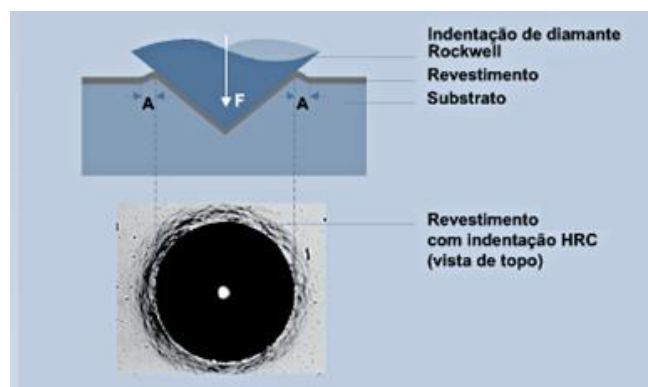


Figura 4.11-Verificação da aderência do revestimento, usando ensaio Rockwell-Adaptado de [47].

O tipo e o volume da zona de falha do revestimento expõem em primeiro lugar a adesão do filme e em segundo lugar a sua fragilidade [54].

As amostras revestidas podem ser adequadamente avaliadas, recorrendo a microscopia ótica convencional. No entanto, o método de controlo de qualidade que se torna mais eficaz é a microscopia e espectroscopia eletrónica de varrimento (*Scanning Electron Microscopy and Spectroscopy*) [54].

A geometria do contacto, em combinação com a intensa transferência de carga, induz tensões de corte extremas na interface. Revestimentos com boa aderência conseguem resistir a estas tensões de corte e evitar a delaminação circunferencial prolongada. As quatro diferentes texturas estão representadas na Figura 4.12, ilustrando as impressões de forma que garantem fortes ligações interfaciais entre o revestimento e o material de base/substrato [54].

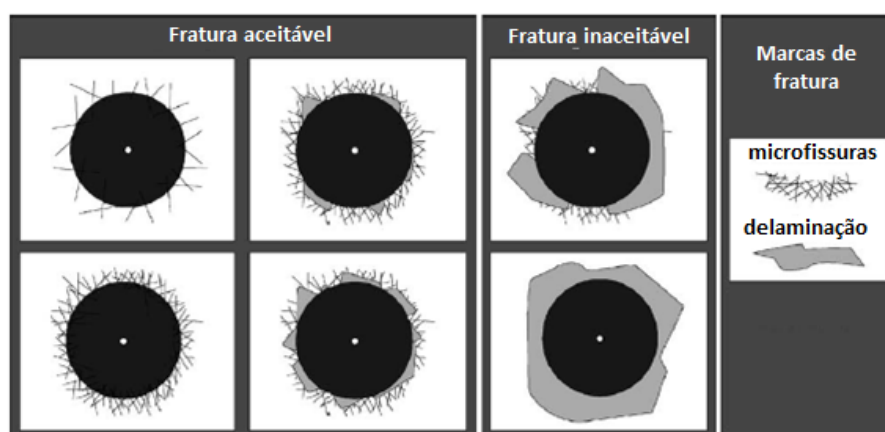


Figura 4.12-Exemplo de fraturas aceitáveis e inaceitáveis no teste de indentação Rockwell- Adaptado de [54].

4.4. Estudo do Comportamento tribológico

Uma vez que o processo de desgaste abrasivo é um sério problema industrial e alvo de uma preocupação crescente, têm vindo a desenvolver-se vários ensaios laboratoriais para testar as propriedades tribológicas dos materiais. Salientam-se os tribómetros de pino-disco e de desgaste por esfera rotativa (*ball-cratering test*). Estes ensaios permitem testar um vasto leque de condições de desgaste. Os tribómetros de desgaste por esfera rotativa apresentam algumas vantagens relativamente ao de pino-disco, uma vez que são relativamente baratos e as amostras testadas podem ter dimensões reduzidas. Por outro lado os equipamentos são bastante simples e de fácil utilização [55].

O ensaio de desgaste por esfera rotativa (*ball-cratering test*) permite tirar conclusões sobre as propriedades tribológicas dos materiais e assim selecionar o melhor para uma dada aplicação [55].

4.4.1. Ensaio de desgaste por esfera rotativa (*ball-cratering test*)

Os ensaios de desgaste são realizados recorrendo ao método de esfera rotativa com pó abrasivo Carboneto de Silício (*Silicon Carbide Powdr-1200 GRIT*) utilizando um tribómetro (*PLINT TE 66 Micro-Scale Abrasion Tester*). Na Figura 4.13, pode ser observada uma imagem do equipamento utilizado neste trabalho, que se encontra no Laboratório do CETRIB, na FEUP.



Figura 4.13-Tribómetro do CETRIB.

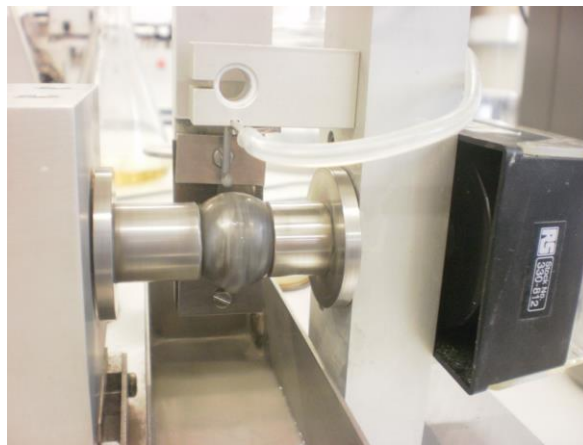


Figura 4.14-Pormenor da esfera rotativa e do provete.

O ensaio de desgaste de microabrasão por esfera rotativa consiste na rotação de uma esfera, previamente atacada com Nital 2% de modo a adquirir alguma rugosidade e, deste modo, arrastar a solução abrasiva que está presente, em contacto com o provete plano. A solução abrasiva provoca desgaste no provete plano com a forma de calote esférica.

Através da medição, no Microscópio Ótico, do diâmetro em duas direções perpendiculares da calote formada (Figura 4.15), é possível determinar o volume desgastado, bem como o coeficiente de desgaste. Este ensaio segue a Norma EN 1071-6:2007.

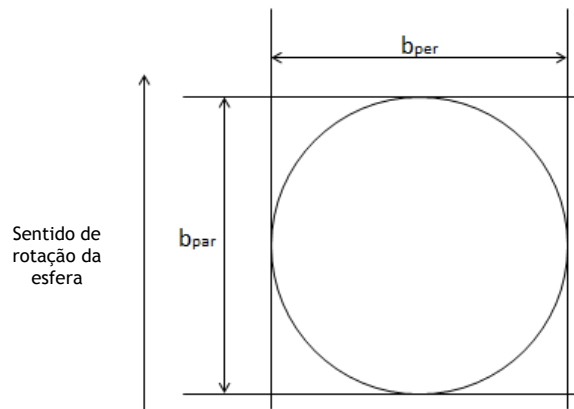


Figura 4.15-Direções de medição do diâmetro da calote de desgaste.

Em que b_{per} é o diâmetro da calote perpendicular ao sentido de rotação da esfera e b_{par} é o diâmetro paralelo ao sentido de rotação da esfera.

4.5. Ensaio de corrosão

A corrosão em meio húmido expressa-se pela reação eletroquímica (oxidação/redução) entre o eletrólito e a superfície do metal provocando a sua ionização [49].

Alguns elementos, como o crómio, têm a capacidade de promover a passivação em muitos meios, incluindo o meio húmido. O ferro puro apresenta reduzida resistência à corrosão; todavia, quando ligado com crómio (12 a 13%), a passividade é suficiente para resistir sem oxidar em vários meios [49].

O poder corrosivo do meio em relação a um metal deve-se principalmente a quatro fatores, a saber: o pH do meio, o teor em iões cloretos, a temperatura e o poder oxidante [49]. A temperatura não afeta o tipo de fenómeno de corrosão, apenas influencia a velocidade e domínio da sua ocorrência.

Existem diversos ensaios de corrosão, entre os quais o ensaio de perda de massa.

4.5.1.1. Ensaio de perda de massa

Os ensaios de perda de massa são os de execução mais fácil. A massa da amostra é determinada antes e após a imersão na solução de ensaio e a velocidade de corrosão é calculada através da perda de massa por unidade de área e por unidade de tempo. A unidade mais usada é o $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{dia}$ [49].

Este ensaio necessita de equipamentos bastante simples e de baixo custo; no entanto, os materiais com boa resistência à corrosão não apresentam uma perda de massa mensurável, pelo que os ensaios podem tornar-se demorados [49].

O ensaio de perda de massa está normalizado pela norma ASTM 631-72 [49].

4.6. Análise Morfológica

4.6.1. Microscopia Eletrónica de Varrimento (MEV / SEM)

A técnica de Microscopia Eletrónica de Varrimento (MEV), também designada por SEM (*Scanning Electron Microscopy*) permite obter informação sobre as características morfológicas, o tamanho de grão, a presença e localização de defeitos e impurezas, bem como avaliar a porosidade do revestimento. Consegue observar-se com alta resolução numa vasta gama de ampliações, alta profundidade de campo (muito superior à apresentada pelos sistemas óticos) e existe a possibilidade de acoplamento a um espectrómetro de raios X, que permite a análise da composição química local.

Esta técnica baseia-se na interação entre um feixe de eletrões de determinada energia e a superfície da amostra a analisar, em vez de luz.



Figura 4.16-Microscópio Eletrónico de Varrimento (CEMUP) [56].

Como é perceptível na Figura 4.17, esta técnica produz um feixe de elétrons acelerado por uma tensão que varia entre 0 e 40KV. Dessa interação resultam elétrons secundários ou de baixa energia, elétrons de elevada energia ou elétrons retro difundidos, elétrons de Auger, elétrons absorvidos, elétrons transmitidos, fótons de radiação X característica e contínua, elétrons difratados, etc [57].

Os elétrons secundários permitem obter indicações sobre a topografia. O contraste na imagem obtida a partir dos elétrons retro difundidos deve-se às diferenças de composição.

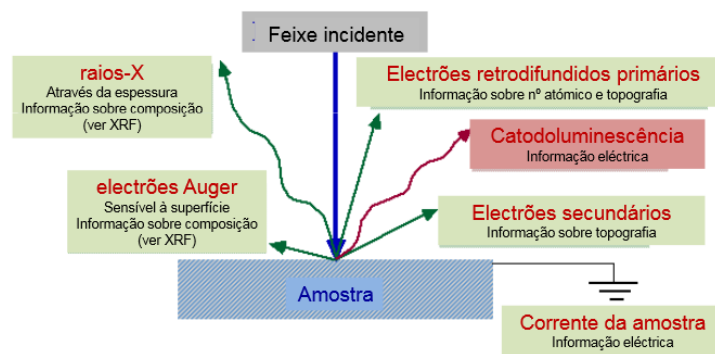


Figura 4.17-Interação entre os elétrons e a amostra [58].

Existem vários requisitos que as amostras devem apresentar para que possam ser caracterizadas por microscopia eletrônica. Têm de apresentar boa condutividade elétrica superficial, caso não apresentem esta característica, ter-se-á que recorrer à metalização, através da aplicação de um revestimento ultra-fino, de Au ou C. Também têm de suportar o vácuo, apresentar estabilidade física e química, nas condições de observação / interação com o feixe eletromagnético.

4.7. Análise da Composição Química

Uma das técnicas utilizadas para analisar a composição química local do revestimento é o ensaio de análise quantitativa por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

4.7.1. Ensaio de análise quantitativa por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

A interação entre os elétrons produzidos pelo canhão de elétrons do SEM e os átomos da superfície da amostra origina vários sinais, entre os quais os raios-X. Os elétrons que se

encontram na zona mais exterior dos átomos da amostra são excitados e mudam de nível, pelo que - ao decaírem para a sua posição inicial - libertam um fóton característico do átomo do qual é proveniente [51].

Como os eletrões de cada átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos presentes naquele local da amostra. A intensidade dos raios-X é proporcional à percentagem ponderal do elemento presente na amostra [51]. No EDS os raios-X da amostra são detetados por um espectrómetro, convertendo-os em impulsos elétricos, proporcionais às energias características dos raios-X, sendo os espectros de EDS construídos a partir dos mesmos.

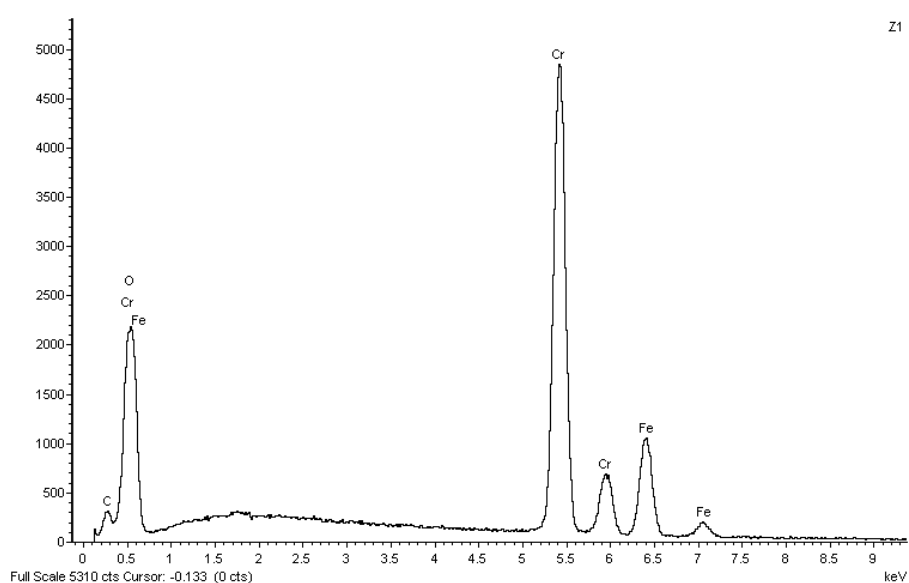


Figura 4.18-Exemplo de espectro EDS.

As amostras têm de ser planas na zona a analisar e, caso existam riscos, estes devem ocupar a menor percentagem da área, de maneira a não interferirem com os resultados obtidos.

Para realização do ensaio acima referido é necessário um EDS para acoplar ao SEM. O princípio de funcionamento do SEM já se encontra descrito no subcapítulo 4.6.1..

No entanto, para a caracterização da composição química é necessário outro equipamento, dado que o SEM/EDS não permite a determinação da estrutura cristalina dos materiais, mas apenas a determinação dos elementos presentes na amostra [51]. O outro equipamento necessário para a identificação das fases cristalinas presentes na amostra é o difratómetro de raios-X [51].

4.7.2. Espectrometria de Emissão Ótica

Esta técnica é uma das mais comuns para a determinação da composição química de materiais metálicos.

O espectrómetro de emissão ótico mede simultaneamente a intensidade das várias linhas espectrais da luz emitida dos átomos que compõem a amostra, quando excitados por uma fonte externa de energia.

A emissão da luz, em forma de radiação monocromática, é consequência do deslocamento de elétrons dos átomos de uma órbita para outra, com mudança no seu estado de energia. Para cada elemento existem vários espectros característicos.

Capítulo 5

Técnicas Experimentais

Neste capítulo serão apresentadas as técnicas, bem como os equipamentos utilizados no decorrer do trabalho experimental.

5.1. Caracterização metalográfica

A preparação metalográfica consistiu nas seguintes etapas:

1. Corte por disco abrasivo da zona dos dentes englobando a zona termicamente afetada e outro corte na zona central do corpo das serras, com uso de lubrificante.
2. Montagem das amostras a quente (*Struers*, Dinamarca), utilizando resina fenólica.
3. Polimento em duas etapas principais: desbaste e acabamento, no equipamento *Struers Pedemax-2* (INEGI).
 - a. As amostras transversais e dos dentes de cada uma das serras foram desbastadas recorrendo a lixas de SiC, com granulometria sucessivamente decrescente (180, 320, 400 e 600 mesh).
 - b. Numa segunda etapa, e depois de limpas as amostras, estas foram submetidas a um acabamento em bases de pano, utilizando suspensão

de diamante de granulometrias de 6 e 1 μ m. Na última etapa de acabamento foi utilizada uma suspensão de sílica coloidal de 0,06 μ m.

Depois de realizadas as etapas da preparação metalográfica descritas anteriormente, as amostras devem apresentar uma superfície plana, limpa e sem riscos. As amostras foram então atacadas quimicamente com Nital 2% (98 ml de etanol e 2 ml de ácido nítrico) durante 8 segundos.

5.2. Análise da morfologia e composição química do revestimento

5.2.1. Microscopia eletrônica de varrimento (MEV/SEM) e Espectroscopia por Dispersão de Raios-X (EDS)

Com vista à análise da morfologia e medição da espessura dos revestimentos, utilizou-se um Microscópio Eletrônico de Varrimento instalado no CEMUP- Centro de Materiais da Universidade do Porto.

Este microscópio é um equipamento de SEM ambiental, marca FEI e modelo Quanta 400 FEG. Pode-se acoplar um sistema de microanálise por raios X (EDS), permitindo assim obter um espectro de composição do revestimento.

No trabalho experimental desenvolvido com o MEV/SEM, utilizou-se uma energia (E_0) para o feixe de 15 keV e uma distância de trabalho (WD) que variou entre 9,6 e 12,3mm. Relativamente ao trabalho desenvolvido com o equipamento de microanálise por raios-X, utilizou-se uma energia de feixe de 15 keV.

5.2.2. Espectroscopia de Emissão Ótica

A composição dos aços foi analisada com base na espectroscopia de emissão ótica, no espectrómetro *SPECTRO Max x* (Figura 5.1), instalado no laboratório de Ensaios Mecânicos, no INEGI.



Figura 5.1-SPECTRO Max x, Alemanha.

5.3. Rugosidade

A análise da rugosidade superficial das serras foi realizada num Microscópio Ótico Industrial 3D- *Bruker NPFLEX™* -, instalado no Laboratório CETRIB, na FEUP. Este equipamento, representado na Figura 5.2, permite uma medição e análise sem contacto de amostras de grandes dimensões, pelo que foi possível colocar as serras inteiras.



Figura 5.2-Microscópio Ótico Industrial 3D- *Bruker NPFLEX™* [59].

O *NPFLEX™* também oferece densidade de dados, resolução e repetibilidade superior ao alcançado com instrumentação de contacto.

5.4. Ensaios tribológicos

Para a realização dos ensaios tribológicos, com a finalidade de avaliar o comportamento dos revestimentos ao desgaste abrasivo, foi utilizado um tribómetro (*TE 66 Micro-Scale Abrasion Tester*, fabricado pela *PLINT & PARTNERS* (UK), instalado no INEGI, já referido em 4.4.1.

O princípio deste ensaio é provocar um desgaste por abrasão acelerado numa amostra revestida ou não, recorrendo a uma solução constituída por água e pó abrasivo, estudando-se posteriormente a calote esférica deixada na aludida amostra. Este equipamento também pode

ser utilizado para provocar uma calote de desgaste, permitindo medir a espessura do revestimento.

Neste ensaio, a esfera é submetida a uma pressão provocada pelo veio motor, girando solidariamente com este a uma velocidade previamente regulada no controlador. O movimento da esfera promove o arrastamento das partículas abrasivas da solução, que são introduzidas no contacto com o auxílio de uma bomba. O contacto entre a esfera e a superfície plana do provete é do tipo não-uniforme. A pressão de contacto entre a esfera e a superfície do provete é ajustada através da colocação de massas num suporte suspenso de um braço apropriado. A solução abrasiva provoca desgaste no provete plano com a forma de calote esférica.

Para a realização deste ensaio é necessário a utilização dos seguintes materiais e equipamentos:

- Água destilada;
- Abrasivo SiC- *Silicon Carbide Powder-1200 GRIT*- numa proporção de 6,4g de SiC para cada 98ml de água;
- Esfera de aço AISI 52100 com 12,5mm de raio, previamente atacada com Nital 2% para conferir alguma rugosidade superficial;
- Agitador magnético;
- Massas calibradas de 0,01 a 2 N;
- Tubo de silicone com $\phi_i = 0,8mm$ e $\phi_e = 3,7mm$, para recolha da solução abrasiva;
- Copo graduado;
- Contentor para a recolha das partículas de SiC após passagem pelo contacto;
- Ferramentas para suporte e fixação dos provetes;
- Provetes/amostras.

Através da medição do diâmetro - utilizando o microscópio ótico - em duas direções perpendiculares da calote formada, é possível determinar o volume desgastado através da seguinte expressão:

$$V = \pi \frac{a^4}{64 \times r} \quad (5.1)$$

Onde V representa o volume desgastado em mm^3 , r o raio da esfera (mm) e a a média dos diâmetros medidos (mm).

Por sua vez, o coeficiente de desgaste é determinado recorrendo à seguinte equação:

$$K_s = \frac{V}{S \times N_p} \quad (5.2)$$

Onde a variável N é a carga aplicada ou a força normal aplicada (N_p) e S a distância de escorregamento (mm).

5.5. Análise e quantificação da espessura do revestimento

5.5.1. Microscopia ótica

Com vista à visualização e análise da espessura dos revestimentos, da microestrutura dos substratos, bem como das calotes de desgaste provenientes do ensaio de desgaste, foi utilizado o microscópio ótico OLYMPUS, modelo PMG3 (Figura 5.3) dotado de uma câmara de 3.34M pixéis. Este equipamento está instalado no Laboratório de Materialografia, no INEGI.



Figura 5.3-Microscópio ótico OLYMPUS PMG3.

5.6. Dureza

Os ensaios de dureza Vickers utilizando 5kgf (EN ISO 6507-1) e Rockwell-C utilizando 150kgf (EN ISO 6508-1) foram realizados na máquina de dureza EMCO-TEST, instalado no Laboratório de Ensaio Mecânicos, no INEGI (Figura 5.4).



Figura 5.4-Máquina de dureza EMCO-TEST.

Os ensaios de microdureza Vickers (NP EN ISO 6507-1) foram realizados num microdurómetro Shimadzu HMV-200 (Figura 5.5), com uma carga de 50gf.



Figura 5.5-Microdurómetro Shimadzu HMV-200.

Capítulo 6

Estudo de revestimentos do disco de serras circulares

Através das técnicas referidas em 5, foi possível estudar e caracterizar os diferentes revestimentos.

6.1. Objetivos

O trabalho experimental realizado é composto por três partes distintas, estando as duas primeiras interligadas entre si. Deste modo, a primeira parte consistiu no estudo comparativo entre duas serras circulares de diferentes fabricantes, uma da FREZITE (Portugal) e outra do Fabricante 1, a nível do revestimento aplicado e suas propriedades, tais como resistência ao desgaste, espessura e dureza, bem como da composição química do aço.

A segunda parte experimental consistiu em executar um revestimento que eliminasse o processo de decapagem com jato de areia como recobrimento da zona oxidada proveniente da brasagem das pastilhas aos dentes da serra; evitasse a oxidação da superfície da serra quando manuseada ou exposta ao ar ambiente; e aumentasse a resistência ao desgaste. Procedendo-se, posteriormente, à análise da respetiva superfície revestida.

Por fim, a terceira parte experimental teve por base o estudo do revestimento de quatro serras circulares finas, com o objetivo de avaliar parâmetros que influenciam a aderência da

madeira e resinas ao corpo da serra durante o processo de corte. A Figura 6.1 apresenta-se um esquema geral do trabalho experimental.

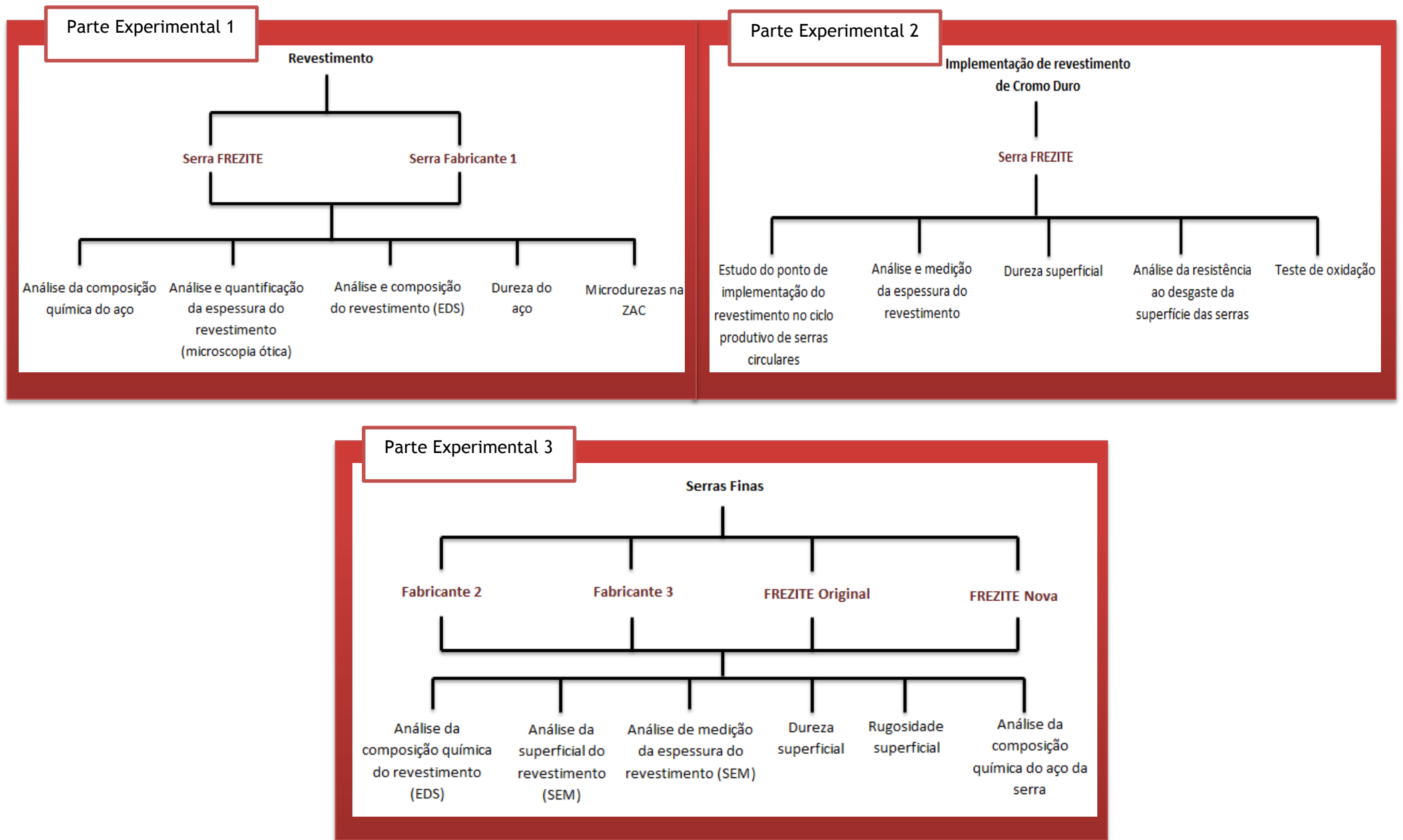


Figura 6.1-Esquema geral do trabalho experimental.

6.2. Estudo comparativo do aço e revestimento de serra circular FREZITE e de outro fabricante

Numa primeira fase, foram cortadas e preparadas amostras de diferentes zonas do disco de cada uma das serras circulares, seguindo o procedimento apresentado em 5.1. Posteriormente, foram realizadas diversas análises ao aço e ao revestimento, como apresentado no esquema da Figura 6.2.

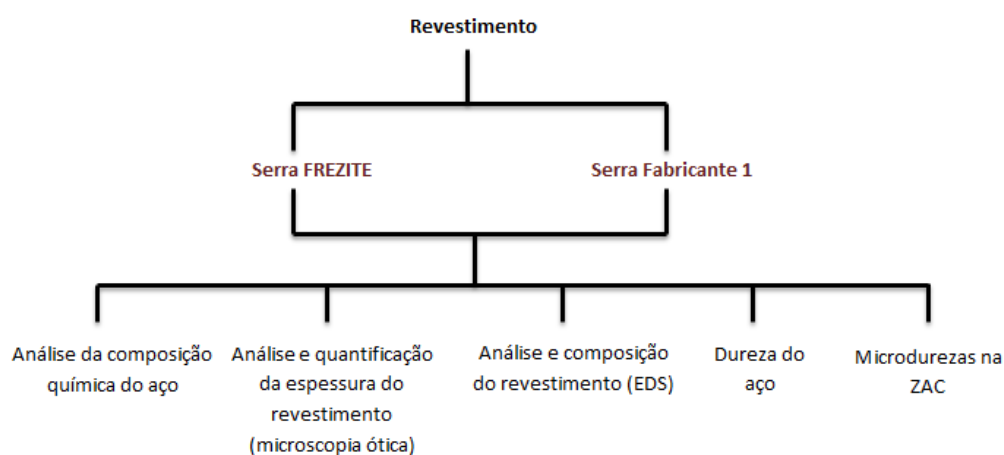


Figura 6.2-Esquema representativo dos métodos utilizados no referido trabalho experimental.

As serras circulares analisadas (Figura 6.3) apresentam geometrias diferentes, mas tal não influencia esta investigação, visto que a geometria não vai ser uma variável a considerar.

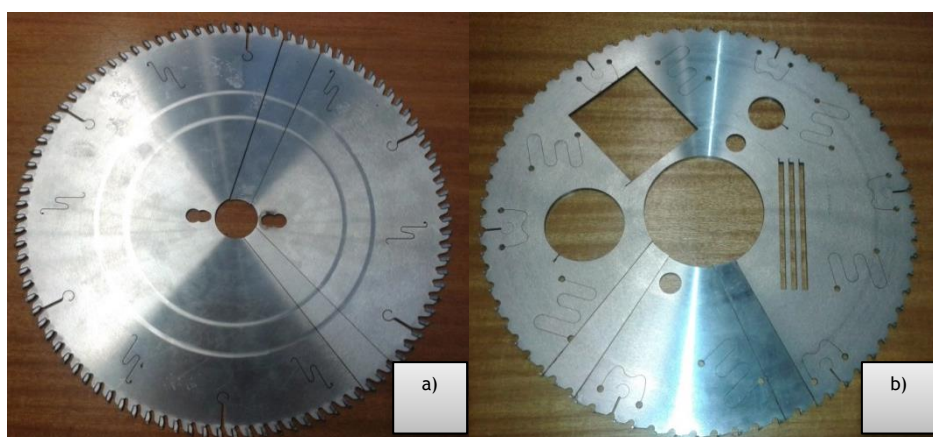


Figura 6.3- Serras circulares analisadas: a) FREZITE; b) Fabricante 1.

6.2.1. Análise da Composição Química do aço das serras

Na produção de serras circulares da FREZITE é utilizado o aço 75Cr1. O aço é enviado no formato de chapas de variados tamanhos, laminadas a frio e temperadas, apresentando uma dureza de aproximadamente 50 HRC e uma rugosidade de $R_{\text{máx}}=10 \mu\text{m}$.

O fabricante indica que a tolerância máxima em relação ao paralelismo é de 0.03 mm e o nivelamento de 0.1 mm.

A sua composição química, fornecida pelo fabricante é apresentada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1-Composição química do aço 75Cr1.

Composição química em %					
C	Si	Mn	P	S	Cr
0.70	0.25	0.60			0.30
-	-	-	-	-	-
0.80	0.50	0.80	0.025	0.010	0.40

Na Figura 6.4 tem-se a relação entre a temperatura do revenido e a dureza. Como a temperatura a que se faz o revenido no forno é de cerca de 500° C, a dureza final obtida é de 40 HRC.

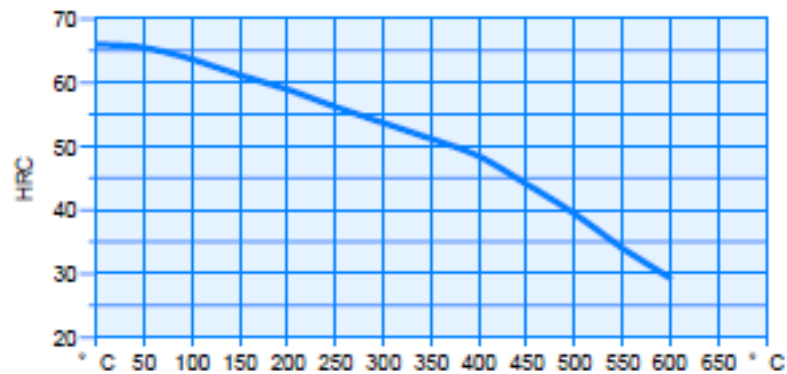


Figura 6.4-Variação da dureza em função da temperatura do revenido.

- Temperatura austenítica: 830 °C - 860 °C
- Meio de têmpera: óleo

As propriedades mecânicas do aço utilizado são:

- Coeficiente de expansão térmica: $16.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;

- Coeficiente de *Poisson*: Sem dados, aproxima-se a 0.3;
- Massa volúmica: 7.90 kg/dm³.

Foi realizada a análise química no *SPECTRO Max x* do aço da serra Fabricante 1 através de espectrometria de emissão ótica, representada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2-Composição química (%) do aço de cada serra circular.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Aço Serra Fabricante 1	0,73	0,24	0,43	0,006	0,007	0,35	1,35

Para melhor visualizar a diferença entre as composições químicas do aço de cada uma das serras realizou-se o gráfico apresentado na Figura 6.5.

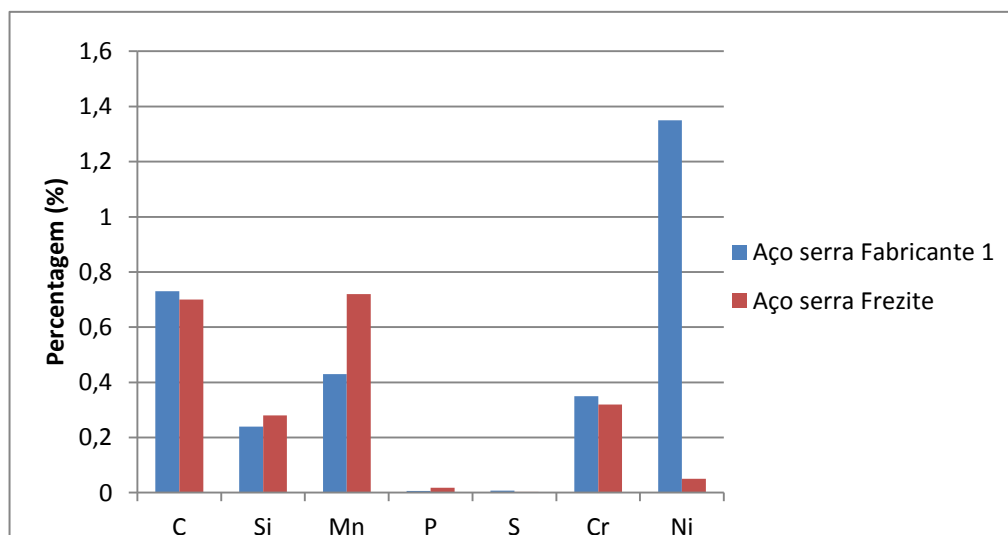


Figura 6.5-Gráfico representativo da composição química de cada aço.

Ao analisar o Figura 6.5, verifica-se que os dois aços apresentam uma composição química semelhante, existindo contudo uma discrepância no que diz respeito ao teor de Ni. O aço da serra Fabricante 1 apresenta um teor de Ni de 1,35 %, e o aço da serra FREZITE apenas apresenta 0,05 %. Este elemento aumenta a penetração de têmpera e a tenacidade dos aços [60].

Ao analisar a composição química do aço da serra do Fabricante 1, tentou-se pesquisar a sua designação no *American Society for Metals* [61]. Assim, constatou-se que o aço que mais se lhe assemelhava era o AISI L2 da Class 230 (Based on Nickel and Greater than 0.65% Carbon) [61].

Nas Figuras 6.6 e 6.7 estão apresentadas as microfotografias dos aços da serra FREZITE e Fabricante 1, respetivamente. É visível que o aço da serra do Fabricante 1 apresenta um grão mais refinado do que o aço da serra FREZITE.

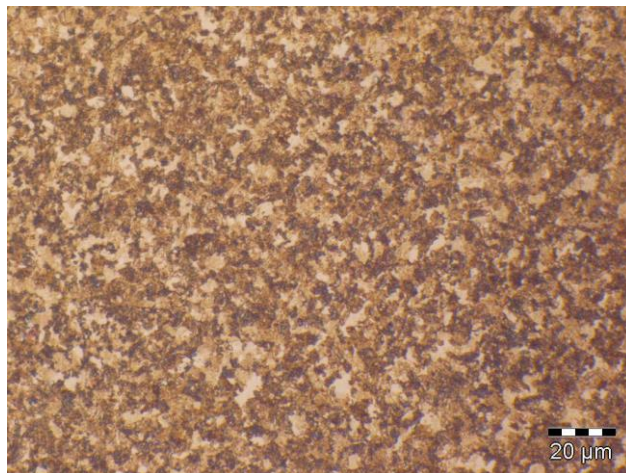


Figura 6.6-Microestrutura do aço da serra FREZITE (com ataque químico).

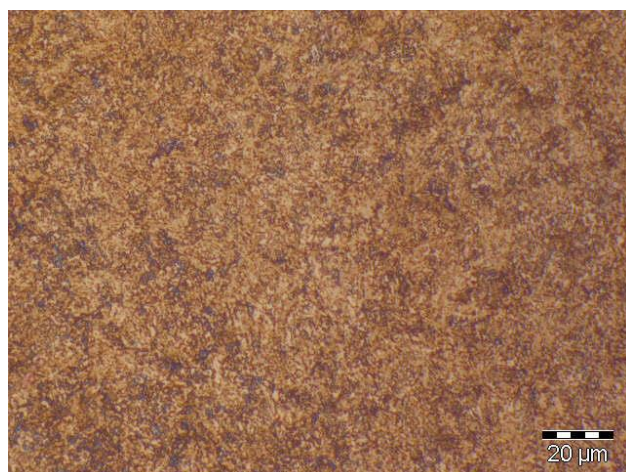


Figura 6.7-Microestrutura do aço da serra do Fabricante 1 (com ataque químico).

6.2.2. Análise e quantificação da espessura do revestimento através de microscopia ótica

Mediu-se a espessura do revestimento das serras FREZITE e Fabricante 1 através de microscopia ótica. Para tal, montaram-se em resina amostras da secção do disco da serra em corte, para assim possibilitar a respetiva medição.

Pode-se observar nas Figuras 6.8 e 6.9 que o revestimento do disco da serra FREZITE apresenta uma espessura regular, na ordem dos 9 μ m, conforme as medições efetuadas. É de referir que o revestimento apresenta alguns pontos negros, que provavelmente serão poros.

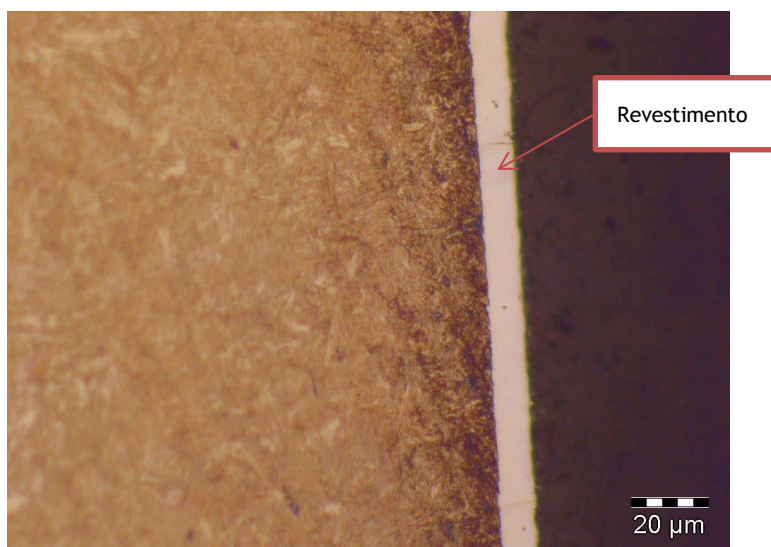


Figura 6.8-Revestimento do disco da serra circular FREZITE (com ataque químico).

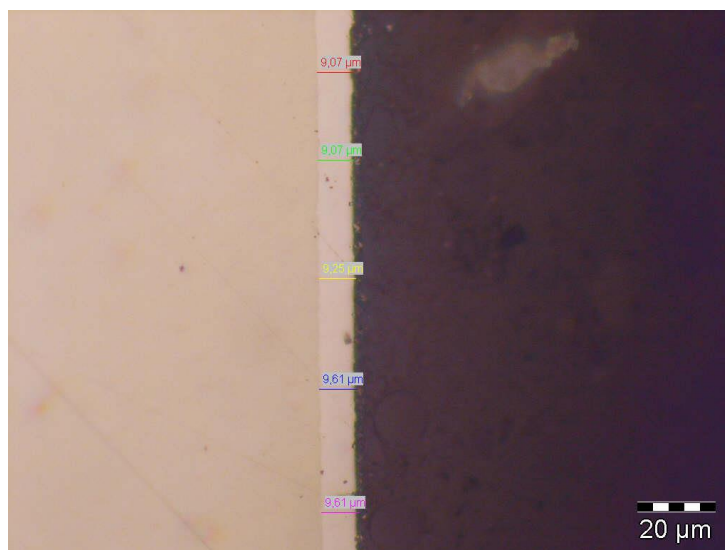


Figura 6.9-Medição da espessura do revestimento da serra circular FREZITE (sem ataque químico).

Na Figura 6.10 e 6.11, observa-se o revestimento do disco da serra Fabricante 1, constatando-se que este apresenta uma espessura muito menor, na ordem dos 2μm, em comparação com a serra FREZITE.

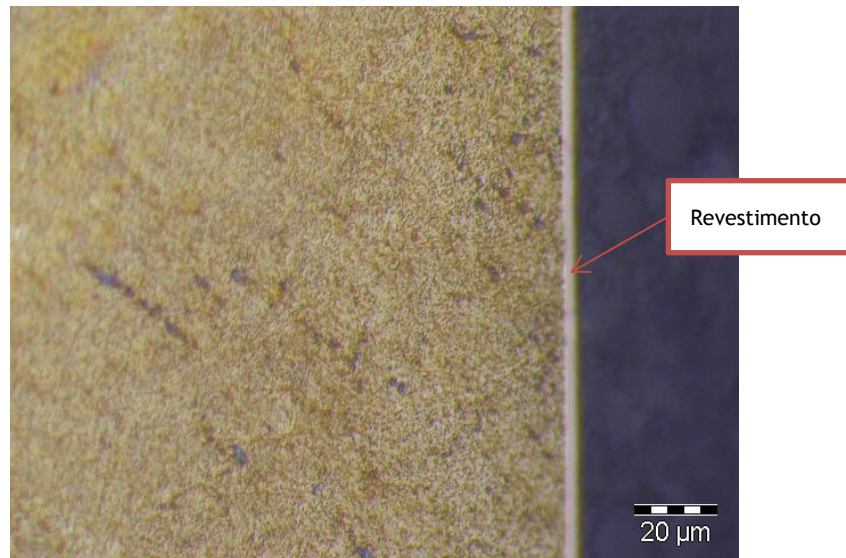


Figura 6.10-Revestimento do disco da serra circular Fabricante 1 (com ataque químico).

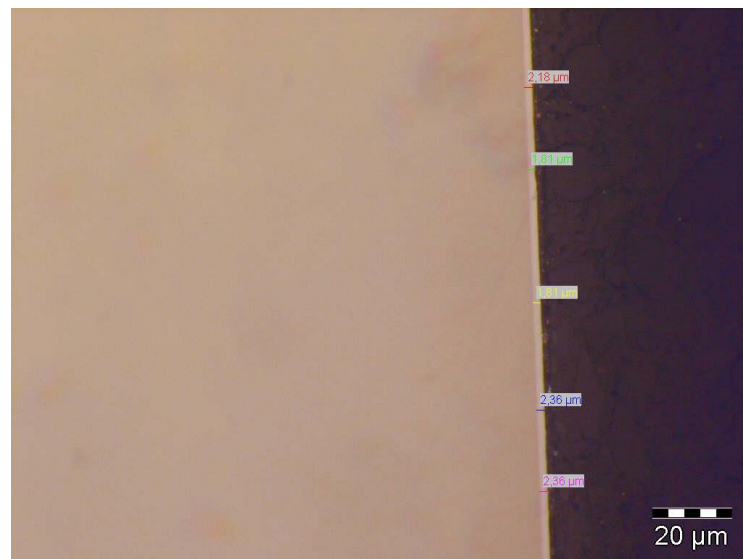


Figura 6.11- Medição da espessura do revestimento do disco da serra circular Fabricante 1 (sem ataque químico).

A Tabela 6.3 apresenta a média de 5 medições efetuadas em cada serra.

Tabela 6.3-Média da espessura de cada revestimento.

Serra	Média da espessura do revestimento (5 medições)
FREZITE	9,30μm
FABRICANTE 1	2,10μm

6.2.3. Análise da composição do revestimento

De maneira a analisar a composição química do revestimento, procedeu-se à análise por espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS) de amostras da superfície de cada uma das serras.

6.2.3.1. Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS)

Os respetivos espectros de composição do revestimento da serra FREZITE e da serra Fabricante 1 estão apresentados nas Figuras 6.12 e 6.13, respetivamente.

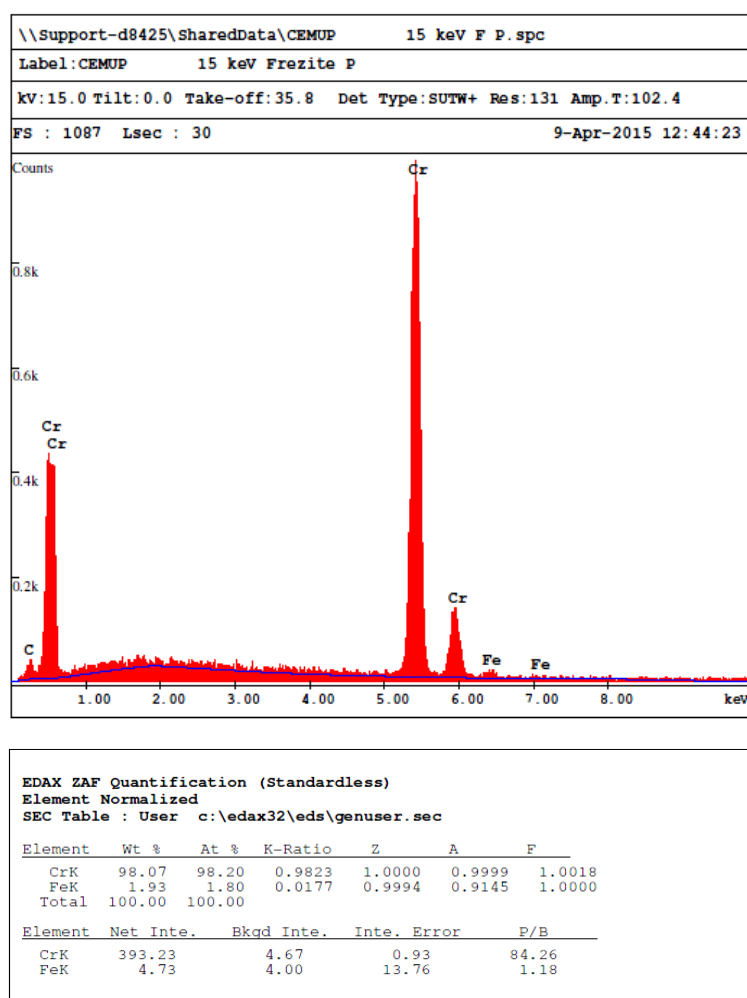


Figura 6.12-Espectro de composição do revestimento da serra FREZITE, por análise EDS.

Na análise do espectro de composição da Figura 6.12, detetou-se a presença de quantidades significativas de Crómio, o que comprova que o revestimento será do tipo Cromo

Duro. Verificam-se também pequenas quantidades de Ferro, que podem provir da superfície da serra, ou então ser um contaminante do processo de revestimento.

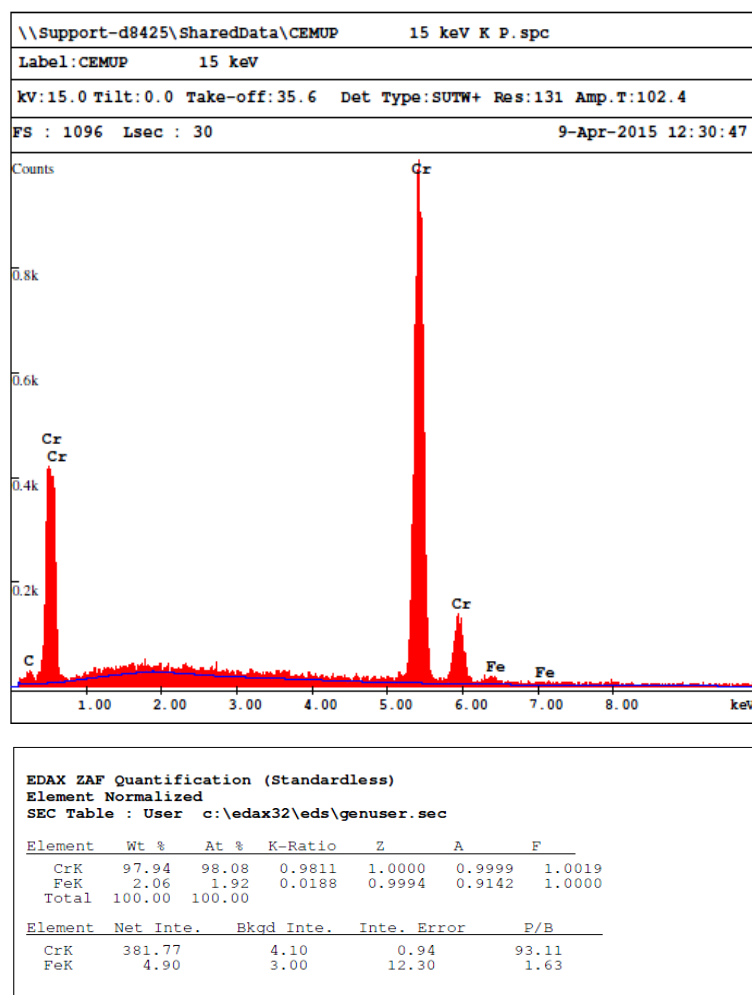


Figura 6.13-Espectro de composição do revestimento da serra Fabricante 1, por análise EDS.

Na análise do espectro de composição do revestimento da serra Fabricante 1 (Figura 6.13) foi detetada a presença de quantidades significativas de Crómio, tal como no revestimento da FREZITE, e as quantidades obtidas para os diferentes elementos nas duas serras são muito semelhantes. Verificam-se também pequenas quantidades de Ferro.

6.2.4. Dureza

6.2.4.1. Comparação de dureza entre o revestimento e o metal base

O revestimento da serra FREZITE possui uma espessura muito pequena, cerca de $9\mu\text{m}$, pelo que não foi possível a medição da sua dureza; por diversos motivos, nomeadamente porque a calote de medição ficaria muito próxima do metal base, não se obtendo resultados fidedignos, ou porque a calote ficaria totalmente fora da espessura do revestimento. Assim, optou-se por realizar várias medições de microdureza (HV 0.05), algumas que abrangiam o revestimento e outras apenas o metal base. Deste modo, apenas se pode afirmar que o revestimento tem maior dureza que o metal base, como demonstra a Figura 6.14.

É visível também que, no metal base, a calote de medição é maior em comparação com as calotes de medição que abrangem parte do revestimento, o que comprova (como os valores indicam) que o revestimento tem uma dureza superior.

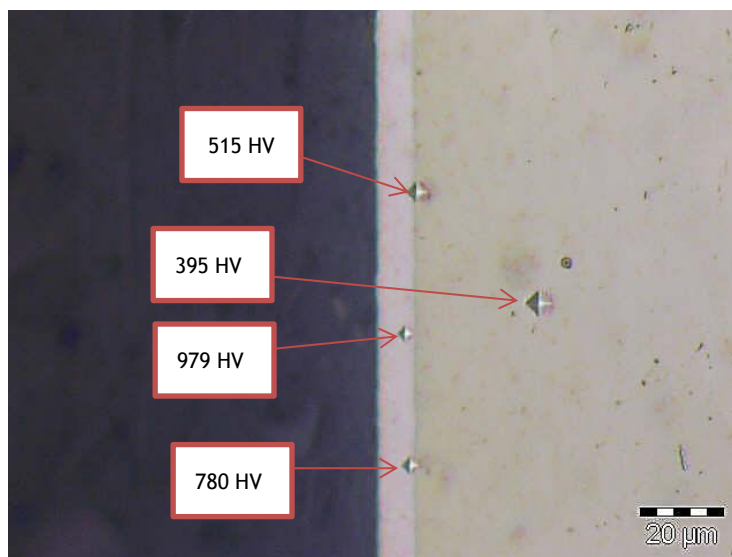


Figura 6.14-Comparação de microdureza HV 0.05 entre o revestimento e o metal base.

6.2.4.2. Dureza do aço na amostra em corte

As medições de dureza Vickers do aço foram efetuadas na amostra em corte (Figura 6.15), para assim medir diretamente no aço. Utilizou-se uma carga de 5kgf. Converteram-se, posteriormente, as durezas para Rockwell-C.

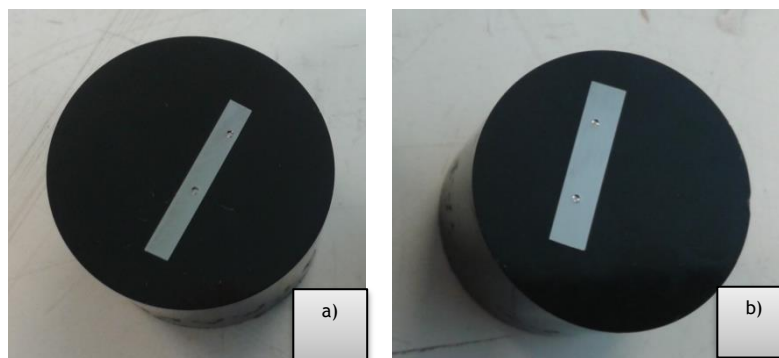


Figura 6.15-Amostra em corte: a) FREZITE; b) Fabricante 1.

Para cada amostra em corte foram realizadas 4 indentações, como apresentado na Tabela 6.4.

Tabela 6.4-Dureza do aço, na amostra em corte.

Dureza HV 5		
Indentação nº	FREZITE-Amostra em corte	Fabricante 1-Amostra em corte
1	412	429
2	423	434
3	423	420
4	417	420
Média	419	426
Dureza HRC		
Média	43	44

6.2.4.3. Dureza na superfície da serra circular

Foram medidas durezas Vickers na superfície de cada uma das serras, da periferia para o centro, ou seja, da zona dos dentes para o centro da serra, de modo a comparar com as durezas medidas em 6.2.4.2., de maneira a concluir sobre a influência do revestimento na dureza medida. Foi utilizada uma carga de 5kgf. Posteriormente, converteram-se para Rockwell-C.

As amostras onde se efetuaram as medições de dureza são restos do disco de cada uma das serras e estão apresentadas na Figura 6.16 e 6.17.

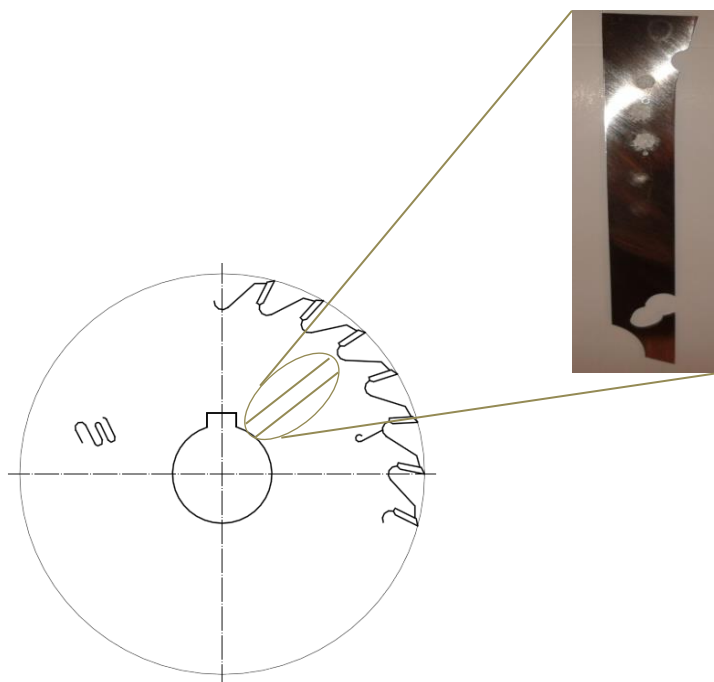


Figura 6.16-Representação da amostra da serra FREZITE.

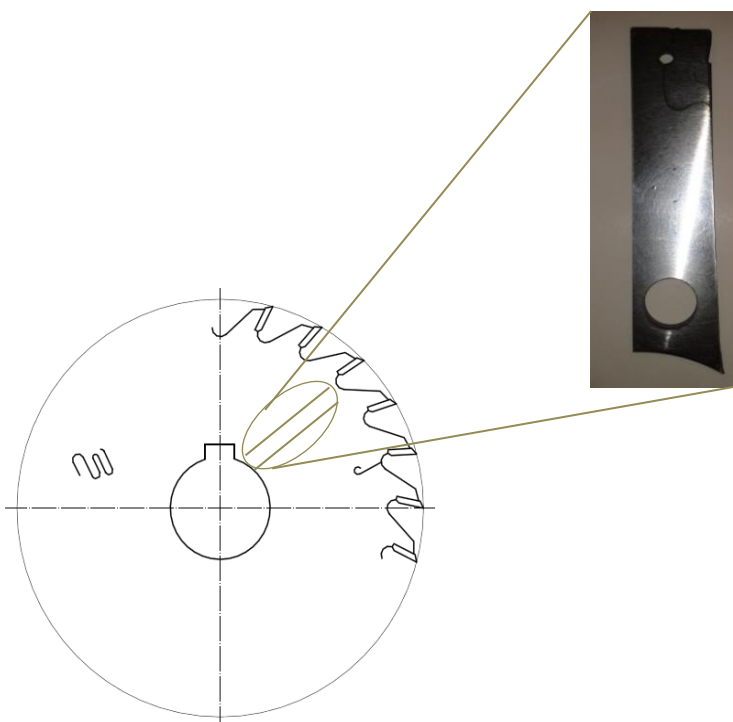


Figura 6.17-Representação da amostra da serra Fabricante 1.

Tabela 6.5-Dureza ao longo das serras, da periferia para o centro da serra.

Durezas HV 5		
Distância desde a primeira medição (mm)	Serra FREZITE	Serra Fabricante 1
10	447	434
20	413	437
30	429	429
40	422	432
50	404	415
60	420	424
70	410	429
80	418	437
90	429	420
100	424	424
110	424	-
120	420	-
Média	422	428
Dureza HRC		
Média	43	44

De maneira a uma visualização mais ampla das durezas medidas anteriormente, realizou-se o gráfico da Figura 6.18.

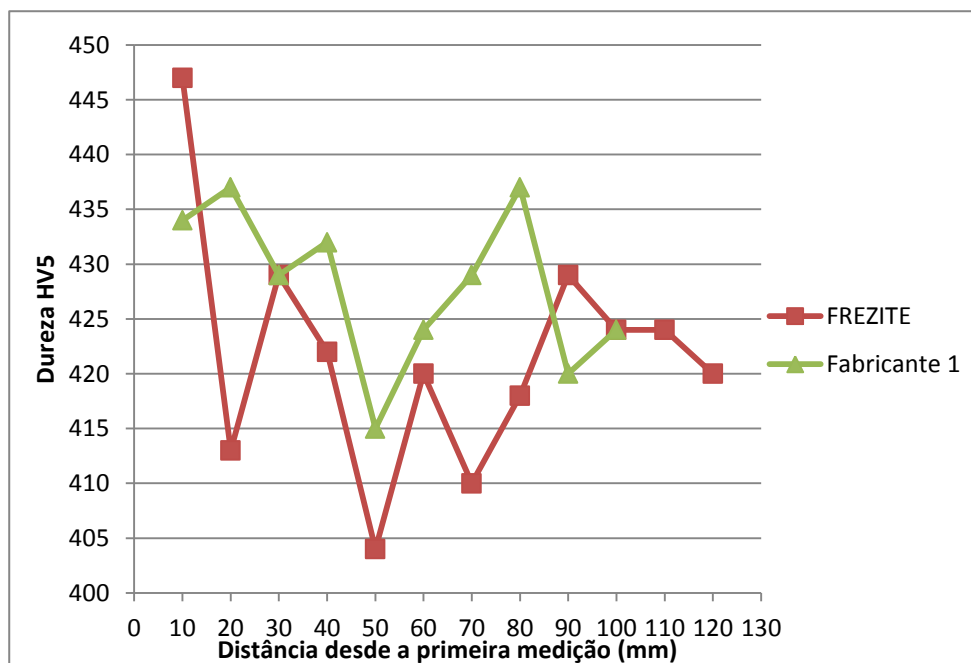


Figura 6.18-Gráfico representativo da dureza HV da superfície da serra, desde a periferia até ao centro da serra, utilizando uma carga de 5kgf.

Os resultados apresentados indicam que a superfície da serra FREZITE está inicialmente mais endurecida do que a superfície da serra Fabricante 1; no entanto, a partir dos

20mm de distância, a dureza superficial da serra Fabricante 1 é sempre maior em relação à da FREZITE. Supõe-se que as durezas medidas correspondam à dureza do aço e não do revestimento, visto que este último tem uma espessura muito pequena, pelo que a calote de medição atinge o substrato, o aço. E, como apresentado em 6.2.4.1, não se atingiram durezas na ordem dos 900 HV.

Recorreu-se, também, a ensaios de microdureza Vickers (carga de 50gf) para avaliar a influência da brasagem das pastilhas ao dente na microdureza do aço. Assim mediu-se junto à zona termicamente afetada pelo calor, bem como numa zona um pouco mais distante. Efetuaram-se as medições em duas amostras de cada uma das serras, representadas nas Figuras 6.19 e 6.20.

É de salientar que as setas de cor verde indicam a direção das medições de microdureza.

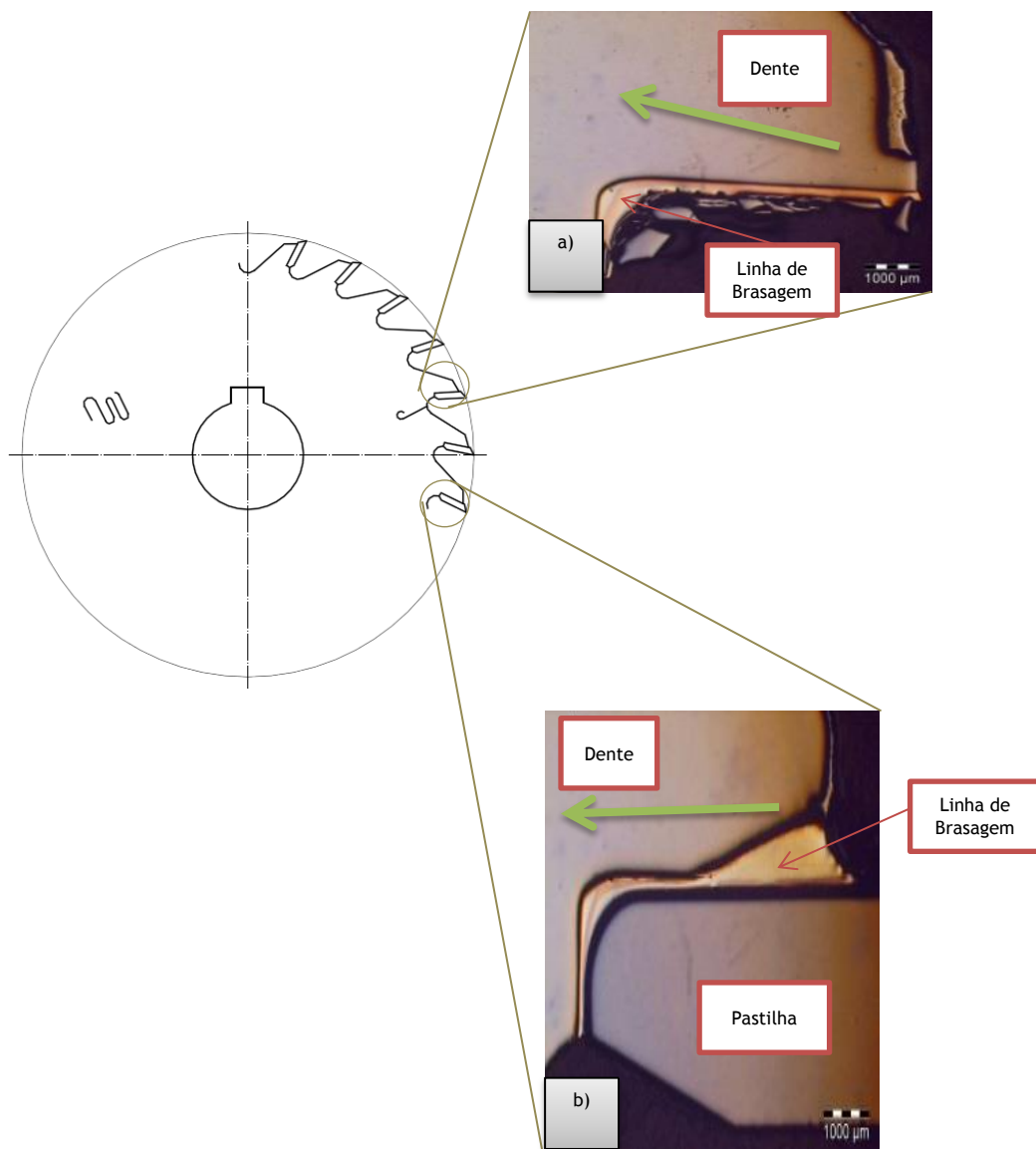


Figura 6.19- Representação gráfica das microfotografias dos dentes da serra FREZITE: a) Amostra 1; b) Amostra 2.

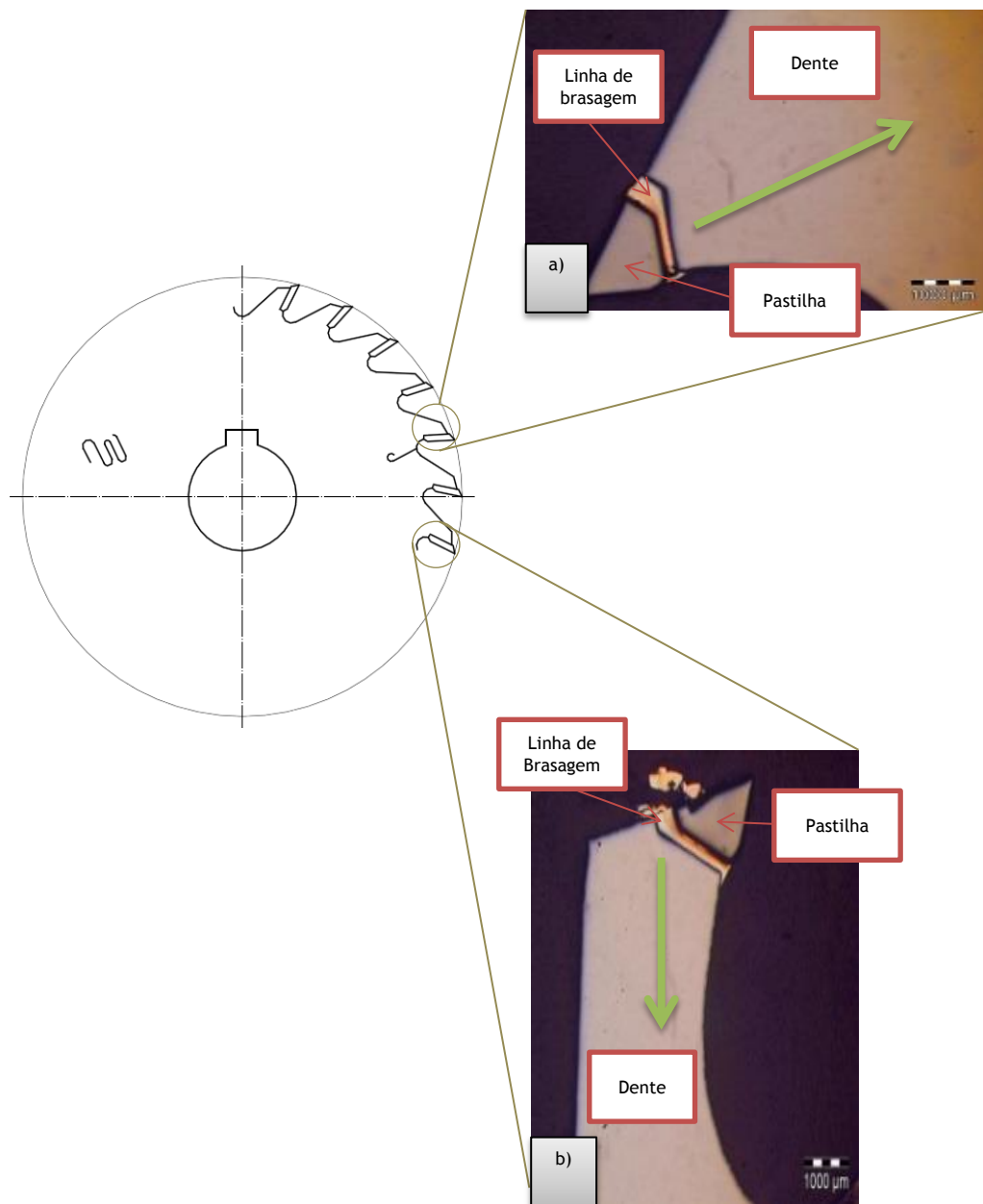


Figura 6.20-Representação gráfica das microfotografias amostras da serra Fabricante 1: a) Amostra 1; b) Amostra 2.

As microdurezas obtidas estão apresentadas na Tabela 6.6.

Tabela 6.6-Microdurezas HV 0.05 junto à zona termicamente afetada pelo calor.

Distância desde a primeira medição (mm)	Microdureza HV 0.05			
	Serra FREZITE		Serra Fabricante 1	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
0,03	385	366	328	388
0,1	401	396	306	355
0,2	386	417	328	340
0,3	388	456	309	342
0,4	378	473	294	346
0,5	403	466	302	317
1	393	406	355	313
2	473	440	403	403
3	473	383	426	426
4	524	403	417	429
5	473	380	-	453
6	362	362	-	434
7	398	393	-	-

Para melhor visualizar a variação de microdurezas, apresentam-se no gráfico da Figura 6.21 os resultados sob a forma gráfica.

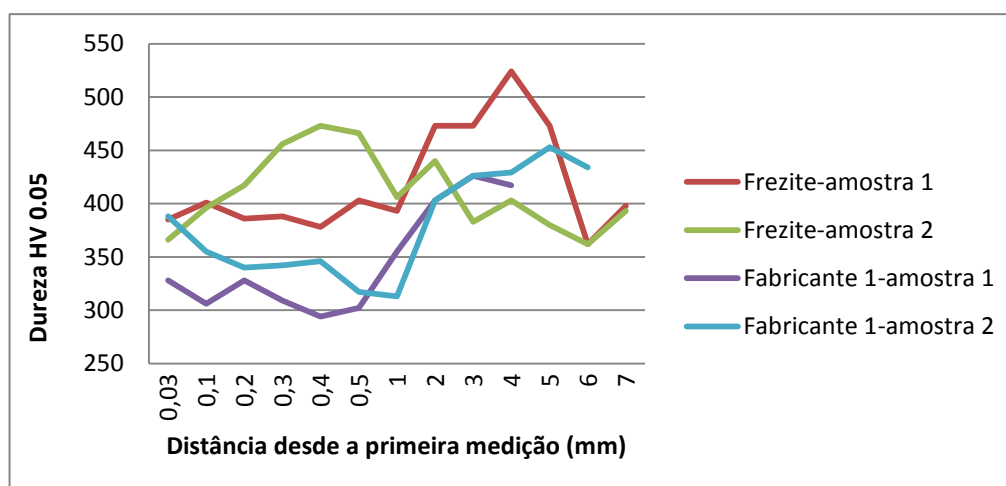


Figura 6.21-Gráfico da distribuição microdureza HV 0.05 das diferentes amostras do dente.

Analisando a Tabela 6.6 e o gráfico da Figura 6.21, verifica-se que a microdureza no caso da serra FREZITE apresenta valores maiores (inicialmente) do que no caso da serra

Fabricante 1; no entanto, a partir dos 1mm de distância do ponto de medição inicial, a microdureza das amostras Fabricante 1 sobrepõe-se às microdurezas das amostras 1 e 2 da serra FREZITE. Deste modo, o aço da serra FREZITE está mais endurecido inicialmente do que a serra Fabricante 1, tal como verificado no ensaio de dureza em 6.2.4.3.

Comparando apenas as amostras da serra Fabricante 1, estas apresentam microdurezas semelhantes, convergindo para um mesmo valor, de aproximadamente 430 HV.

Como a espessura do revestimento é na ordem dos micróns, as microdurezas apresentadas apenas correspondem ao substrato, ou seja, ao aço da serra circular.

6.3. Estudo de revestimento de Cromo Duro

O segundo trabalho experimental consiste no estudo de revestimento de Cromo Duro.

Com o revestimento de Cromo Duro pretende-se:

- Eliminar o processo de decapagem com jato de areia como recobrimento da zona oxidada proveniente da brasagem das pastilhas aos dentes da serra;
- Evitar a oxidação da superfície da serra quando é manuseada;
- Aumentar a resistência ao desgaste da superfície do disco.

O esquema representativo das etapas deste trabalho experimental encontra-se na Figura 6.22.



Figura 6.22-Esquema representativo dos métodos utilizados no referido trabalho experimental.

6.3.1. Estudo do ponto de implementação do revestimento de Cromo Duro no ciclo produtivo de serras circulares

A serra FREZITE, sem qualquer revestimento superficial, vai ser chamada de FREZITE Original. Encontra-se representada na Figura 6.23, onde é visível a zona oxidada junto ao dente, devido às altas temperaturas utilizadas no processo de brasagem das pastilhas de corte ao dente. Esta é uma zona mais escura, não conferindo um aspeto visual agradável.



Figura 6.23-Serra circular no estado em que é comercializada, sem revestimento superficial (Serra FREZITE Original).

Como tal, testou-se em duas serras circulares de igual diâmetro que a serra FREZITE Original (aproximadamente 25mm) um revestimento de Cromo Duro de proteção com cerca de 3 μ m de espessura, executado na Galvano Chrome, como será descrito seguidamente.

As Figuras 6.24 e 6.25 correspondem à serra na qual foi efetuado o revestimento de Cromo Duro em primeiro lugar e só posteriormente se brasou as pastilhas aos dentes. Ao contrário da serra da Figura 6.26, onde o procedimento se efetuou na ordem inversa, ou seja, primeiro efetuou-se a brasagem das pastilhas aos dentes da serra e só depois o revestimento da superfície com Cromo Duro.



Figura 6.24-Serra circular com revestimento Cromo Duro e posteriormente as pastilhas brasadas (Serra FREZITE Cromo1).



Figura 6.25-Pormenor da zona oxidada.



Figura 6.26-Serra circular FREZITE com pastilhas brasadas e posteriormente revestimento Cromo Duro (Serra FREZITE Cromo 2).

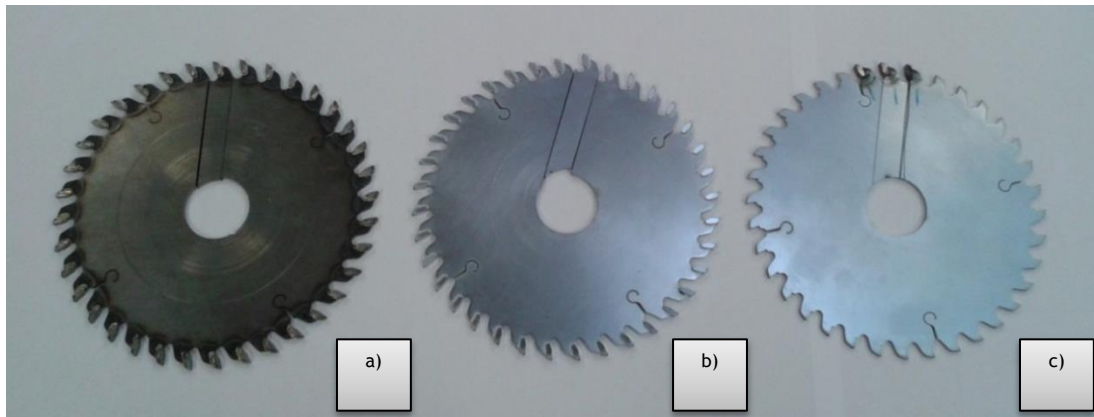


Figura 6.27-Serras circulares: a) FREZITE Original; b) FREZITE Cromo 2; c) FREZITE Cromo 1.

Ao efetuar o revestimento Cromo Duro depois de estarem as pastilhas brasadas nos dentes da serra, consegue-se esconder a zona oxidada, o que não acontece quando se efetua o Cromo Duro em primeiro lugar e só depois se brasam as pastilhas nos dentes. Assim, efetuar um revestimento de Cromo Duro depois de brasar as pastilhas ao dente da serra, é uma alternativa à decapagem com jato de areia, para ocultar a zona oxidada decorrente da brasagem.

6.3.2. Análise e medição do revestimento de Cromo Duro

De modo a visualizar o revestimento de Cromo Duro, prepararam-se amostras em corte para conseguir visualizar o revestimento ao microscópio ótico.

Na Figuras 6.28 e 6.29, estão representadas as medições efetuadas para a serra FREZITE Cromo 1 e Serra FREZITE Cromo 2, respetivamente.

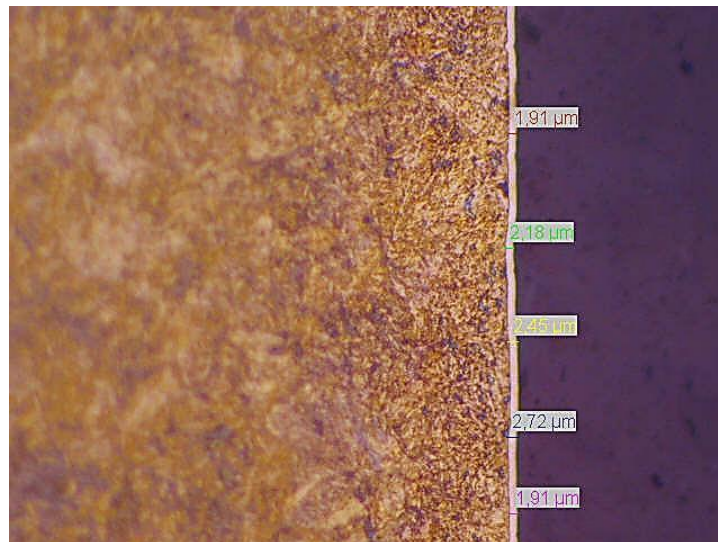


Figura 6.28-Medição da espessura do revestimento de Cromo Duro da Serra FREZITE Cromo 1.

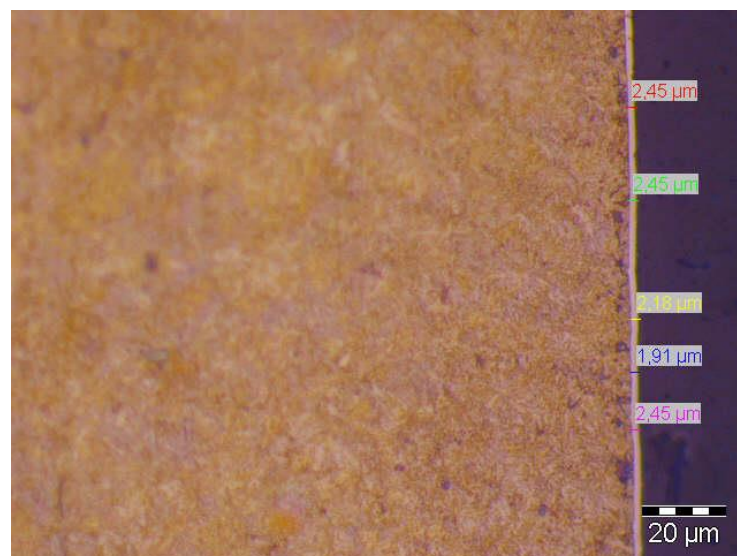


Figura 6.29- Medição da espessura do revestimento de Cromo Duro da Serra FREZITE Cromo 2.

Tal como seria esperado, a espessura do revestimento é semelhante nas duas serras cromadas e é da ordem dos $2\mu\text{m}$, pois trata-se apenas de um revestimento de proteção.

6.3.3. Dureza

Determinou-se a dureza no disco de cada serra, de modo tentar verificar a influência do revestimento de Cromo Duro. Neste caso, determinou-se diretamente a dureza Rockwell-C, visto que o processo de medição é mais rápido do que o ensaio Vickers.

Tabela 6.7-Durezas HRC de cada uma das serras FREZITE.

Amostra	Dureza (HRC)	Média (HRC)
FREZITE Original	40	40
	41	
	40	
FREZITE Cromo 1	39	40
	40	
	40	
FREZITE Cromo 2	40	40
	41	
	39	

Examinando a Tabela 6.7, verifica-se que as durezas de cada uma das serras são semelhantes, pelo que o revestimento de Cromo Duro não tem influência na dureza Rockwell-C. Tal acontece porque a carga aplicada no ensaio Rockwell-C (150kgf) é elevada, penetrando por completo no substrato (aço) e o revestimento tem uma espessura muito pequena.

De maneira a tentar verificar, mais uma vez, a influência de efetuar o revestimento de Cromo Duro, bem como avaliar a dureza na zona termicamente afetada pelo calor, realizou-se uma filiação de microdurezas. O facto da carga utilizada ser muito mais pequena (50gf) que no ensaio anterior (150kgf) pode levar a diferentes resultados, que estão apresentados na Tabela 6.8 e no Gráfico 6.30.

Tabela 6.8 -Microdurezas desde a Zona Termicamente Afetada pelo Calor para o centro da serra.

Microdureza HV 0.05			
Distância desde a primeira medição (mm)	FREZITE Original	FREZITE Cromo 1	FREZITE Cromo 2
0,03	313	373	398
0,1	309	388	370
0,2	320	409	403
0,3	309	380	370
0,4	318	373	364
0,5	320	376	376
1	317	366	359
2	306	374	357
3	299	342	360
4	308	332	353
5	311	334	346
6	346	353	351
7	376	359	373
8	422	380	401
9	414	420	403

A representação gráfica da Tabela 6.8 encontra-se no gráfico da Figura 6.30.

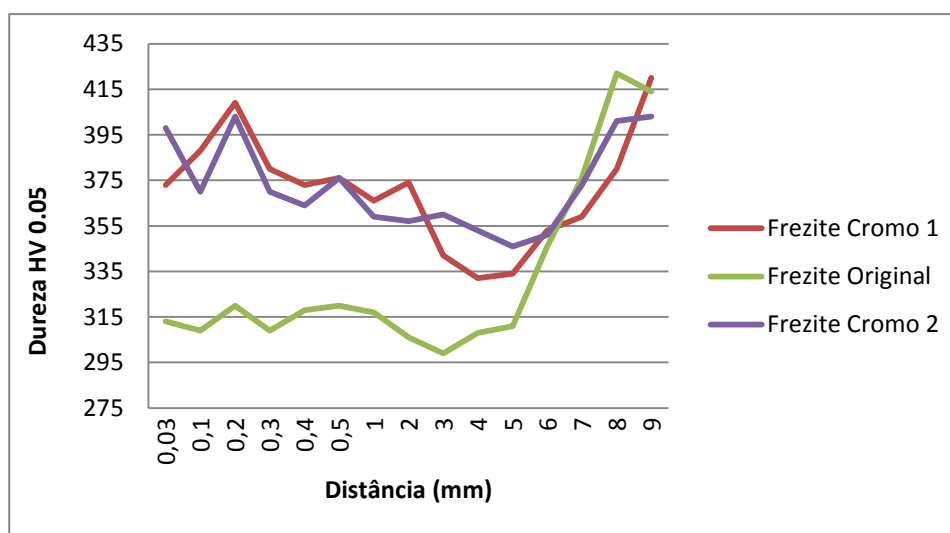


Figura 6.30-Gráfico das Microdurezas no dente da serra, desde a periferia em direção ao centro.

De acordo com o gráfico da Figura 6.30, o revestimento de Cromo Duro efetuado nas serras FREZITE Cromo 1 e FREZITE Cromo 2 aumenta a dureza superficial. No entanto, não existe diferença em termos de dureza em aplicar o revestimento de Cromo Duro e depois brasar

as pastilhas nos dentes ou vice-versa. Também é de notar que existe um decaimento da dureza, desde a primeira medição até aos 5mm de distância desde primeira medição, pois a brasagem das pastilhas dá-se a uma temperatura superior a 600 °C, pelo que se efetua um revenido localizado que provoca diminuição da dureza.

À medida que nos afastamos da zona termicamente afetada pelo calor, a dureza aumenta repentinamente nas três serras, convergindo para um valor muito próximo (400-420 HV).

Ao contrário do que acontece na medição de dureza HRC (Tabela 6.7), no ensaio de microdureza Vickers é visível o aumento de dureza que é provocado pelo revestimento de Cromo Duro. Tal acontece porque, no ensaio de microdureza, é utilizada uma carga muito inferior (50gf) à que se emprega no ensaio de dureza Rockwell-C (150kgf), pelo que no primeiro a penetração é menos profunda, não penetrando por completo no aço.

6.3.4. Análise da resistência ao desgaste do revestimento de Cromo Duro

6.3.4.1. Ensaio de desgaste por esfera rotativa

O ensaio de desgaste foi efetuado para duas serras circulares FREZITE (FREZITE Original e FREZITE Cromo 1), mas visto que a serra Fabricante 1 estudada em 6.2 também possui um revestimento de Cromo Duro, foi ainda incluída no ensaio de desgaste. Sendo esta serra considerada líder mundial, pareceu útil assegurar a existência de um termo de comparação.

Das serras integrais foram retiradas amostras para a realização do ensaio de desgaste.

Os ensaios de desgaste foram realizados com uma velocidade de rotação constante de 80 rpm e a carga aplicada foi de 0,25N. Estes parâmetros estão de acordo com a Norma EN 1071-6:2007.

Depois de realizados os ensaios, observaram-se as calotes obtidas ao microscópio ótico (Figura 6.31) para assim determinar o diâmetro da calote de desgaste. Efetuaram-se medições para 100, 200, 300, 500 e 700 rotações da esfera.

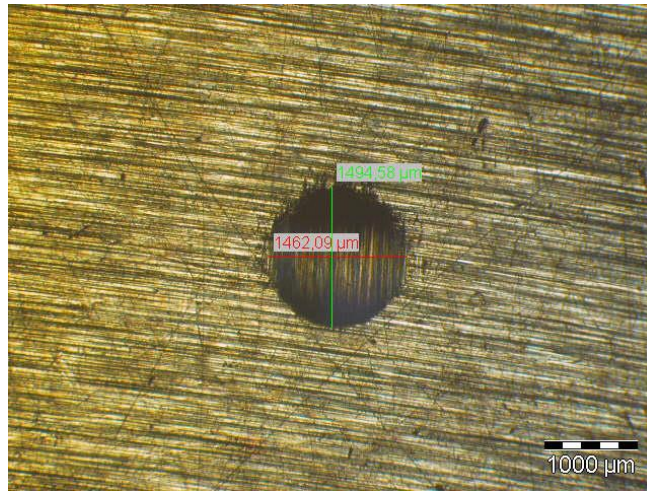


Figura 6.31-Exemplo de calote de desgaste.

Seguidamente serão apresentados os gráficos que ilustram o volume desgastado em função do número de rotações e distância de escorregamento-*S*- (mm).

Para obter resultados mais credíveis, realizou-se duas vezes o ensaio de microabrasão em cada amostra/provete, utilizando a média dos resultados obtidos em cada série para a realização dos gráficos da Figura 6.32. É de salientar que também se realizou o ensaio de desgaste para a serra Fabricante 1.

Como o revestimento era o mesmo nas serras FREZITE Cromo 1 e FREZITE Cromo 2, apenas se realizou o ensaio de microabrasão numa delas, neste caso FREZITE Cromo 1.

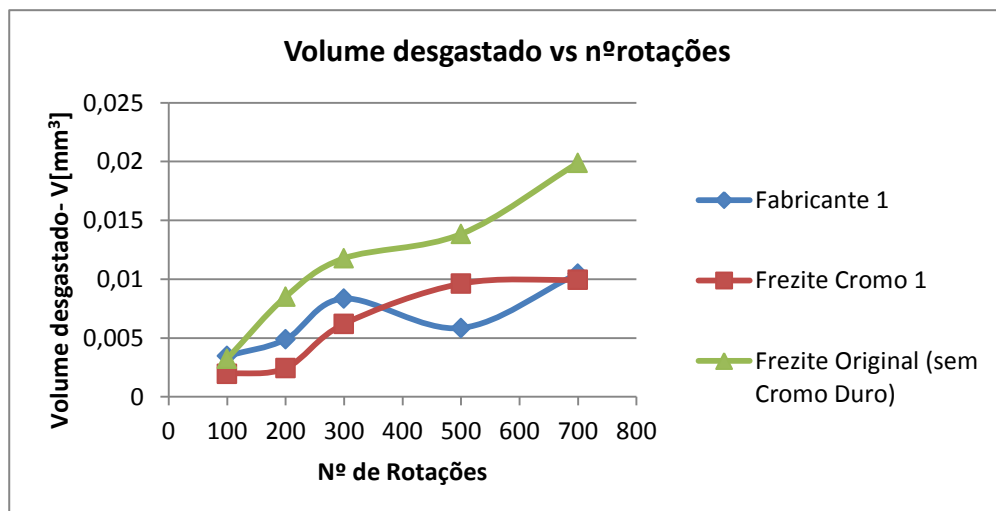


Figura 6.32-Gráfico representativo do Volume desgastado vs Nº de Rotações.

Sabe-se que os revestimentos de cada amostra não são exatamente iguais, daí que as amostras apresentem desgaste superficial diferente. Assim, ao analisar o gráfico da Figura 6.32, é possível identificar os materiais com o melhor comportamento ao desgaste.

O material do revestimento da serra da FREZITE Cromo 1 apresenta bom comportamento ao desgaste, tal como o material da serra da Fabricante 1.

Já era de esperar que a serra FREZITE Original, que não possui qualquer revestimento superficial, sofresse um desgaste mais acentuado, em comparação com as restantes serras, que possuem revestimento.

Como tal, a aplicação de Cromo Duro no disco da serra permite reduzir os níveis de desgaste da superfície que está em contacto com detritos resultantes do corte de madeira.

6.3.5. Teste de Oxidação

Com o objetivo de avaliar a resistência à oxidação do revestimento efetuado, colocou-se água na superfície de cada uma das serras. Dois dias depois avaliou-se o resultado, que se encontra expresso nas Figuras 6.33, 6.34 e 6.35.

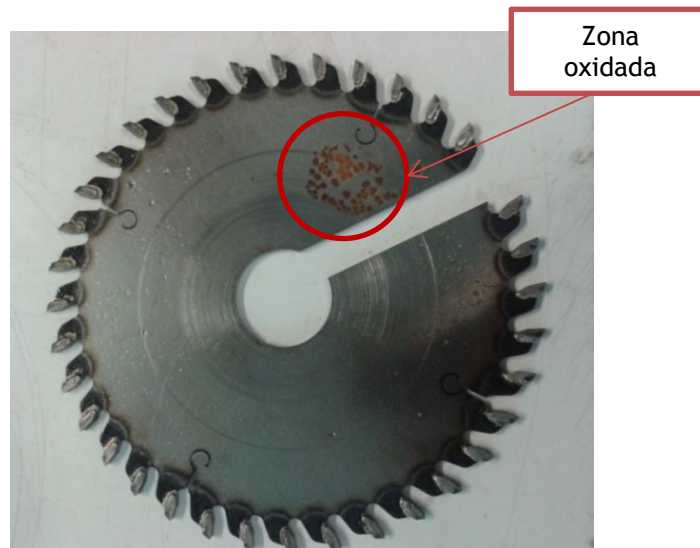


Figura 6.33-Serra FREZITE sem Revestimento (FREZITE Original).

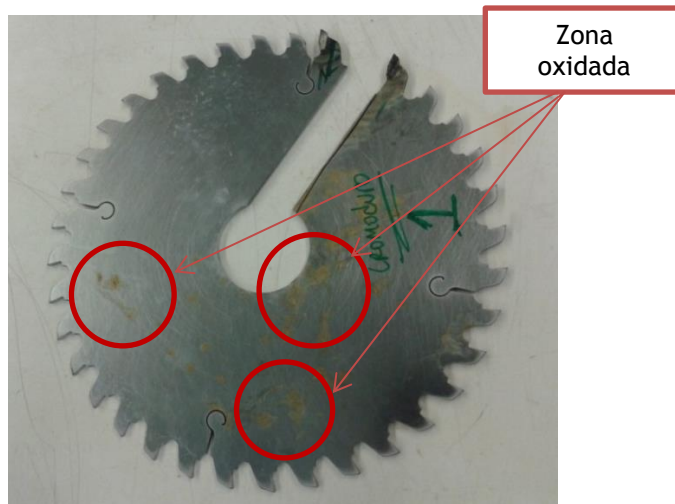


Figura 6.34-Serra FREZITE Cromo 1.

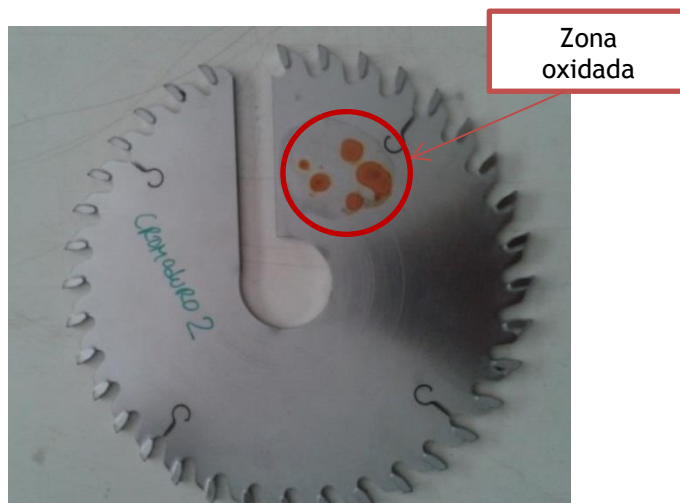


Figura 6.35-Serra FREZITE Cromo 2.

Como já era de esperar, a serra FREZITE Original oxidou no local onde se colocou água. Não possuía qualquer tipo de revestimento, assim o aço oxidou.

No entanto, não se esperava que as serras FREZITE Cromo 1 e FREZITE Cromo 2 oxidassem. Tal pode ter acontecido porque o revestimento de Cromo Duro tem uma espessura muito reduzida e também pelo facto deste teste de oxidação ter sido bastante agressivo. No caso da serra FREZITE Cromo 1 (Figura 6.34), a água espalhou-se pela superfície da serra, pelo que apresenta várias zonas oxidadas, como indicado.

Assim, a espessura de revestimento para um ataque tão intenso não é suficiente. Porém, como não estarão sujeitas a um ataque desta dimensão, é mais que suficiente a utilização do mesmo para evitar a oxidação provocada pelo manuseamento das serras, bem como por ambientes húmidos.

6.4. Estudo de revestimento de serras finas que diminua a aderência da madeira ao disco durante o corte

A terceira parte experimental consistiu num estudo do revestimento de quatro serras finas (espessura inferior a 1mm), dos seguintes fornecedores, Fabricante 2, Fabricante 3 e duas FREZITE.

As serras finas são utilizadas para uma aplicação específica, nomeadamente quando se pretende cortar lamelas de madeira (Figura 6.35), sem grande desperdício de material. Esta aplicação é muito exigente em termos de contacto da superfície das serras com resinas ou colas provenientes da madeira, bem como detritos provenientes do corte, pois podem travar o funcionamento da serra. As serras finas Fabricante 2 e Fabricante 3 funcionam bem, mas o mesmo não sucede com a serra FREZITE (a qual se denominou FREZITE Original), pelo que se pretende a melhoria das suas características, que estão a ser implementadas na serra a que se chamou FREZITE Nova.



Figura 6.36-Lamelas de madeira.

O esquema representativo deste trabalho experimental está explícito na Figura 6.37.

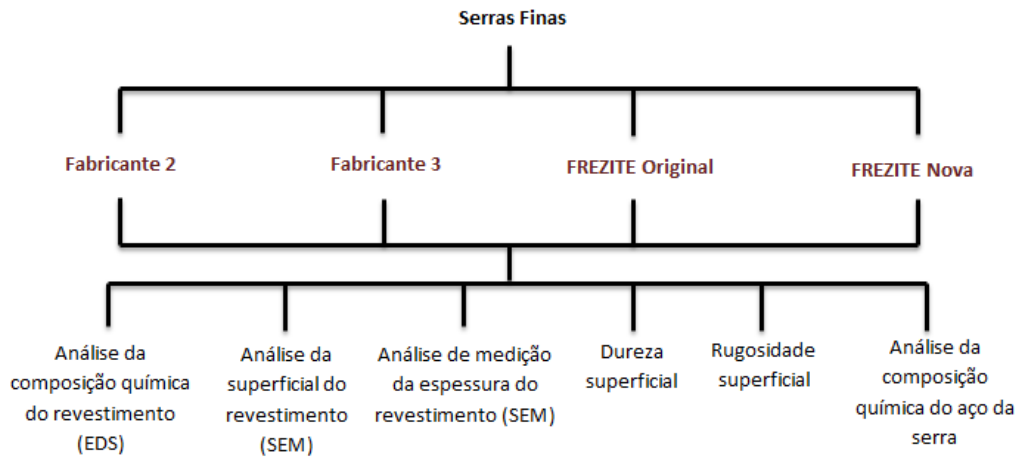


Figura 6.37-Esquema representativo da terceira parte experimental.

As serras alvo de estudo estão representadas nas Figuras 6.38, 6.39, 6.40 e 6.41.



Figura 6.38-Serra Circular Fina Fabricante 2.



Figura 6.39-Serra Circular Fina Fabricante 3.



Figura 6.40-Serra Circular Fina FREZITE Original.



Figura 6.41-Serra Circular Fina FREZITE Nova.

A Serra FREZITE Original, comercializada pela FREZITE, sofreu um revestimento de oxidação negra e apresenta uma cor não uniforme, ou seja, uma cor mais clara no centro porque foi ao forno depois da oxidação.

Por sua vez, a Serra FREZITE Nova, é a serra onde estão a ser implementadas as melhorias, e além do processo normal de retificação adicionou-se o processo de polimento com uma mó de cortiça (Figura 6.42) da empresa *Schmitz Schleifmittelwerk GmbH*-Alemanha e depois sofreu oxidação negra. É importante salientar que no processo de fabrico das serras finas, a etapa de polimento descrita no capítulo 2.5 não se aplica.

O processo de retificação reduz a espessura da serra e deixa um mau acabamento, enquanto o polimento não reduz a espessura, apenas melhora o acabamento.



Figura 6.42-Mó de cortiça utilizada para o polimento da serra FREZITE Nova.

6.4.1. Análise da Composição Química do revestimento

Com recurso a microanálise por raios X (EDS) foi possível determinar a composição química do revestimento do disco de cada serra fina. Os espectros obtidos estão representados nas Figuras 6.43, 6.44, 6.45 e 6.46.

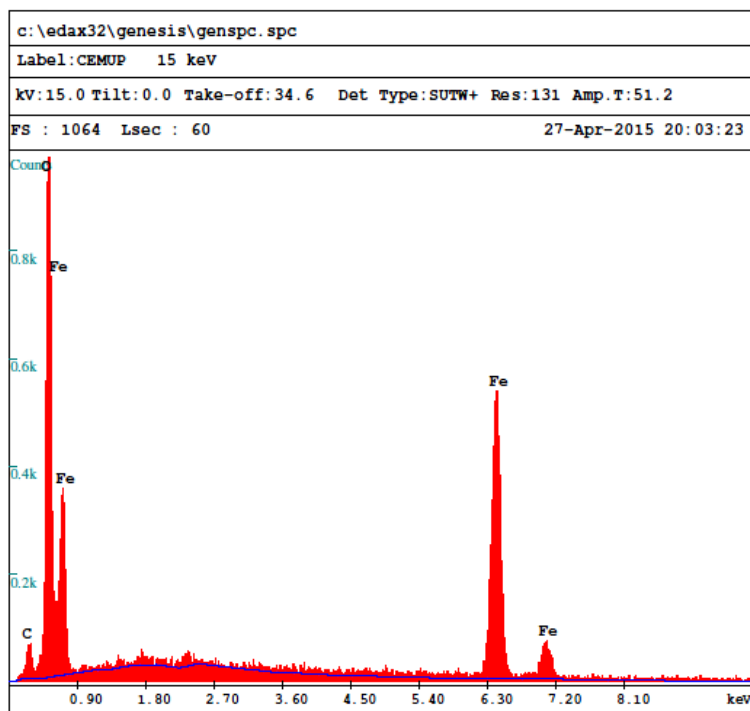


Figura 6.43-Espetro de composição do revestimento da serra Fina Fabricante 2, por análise EDS.

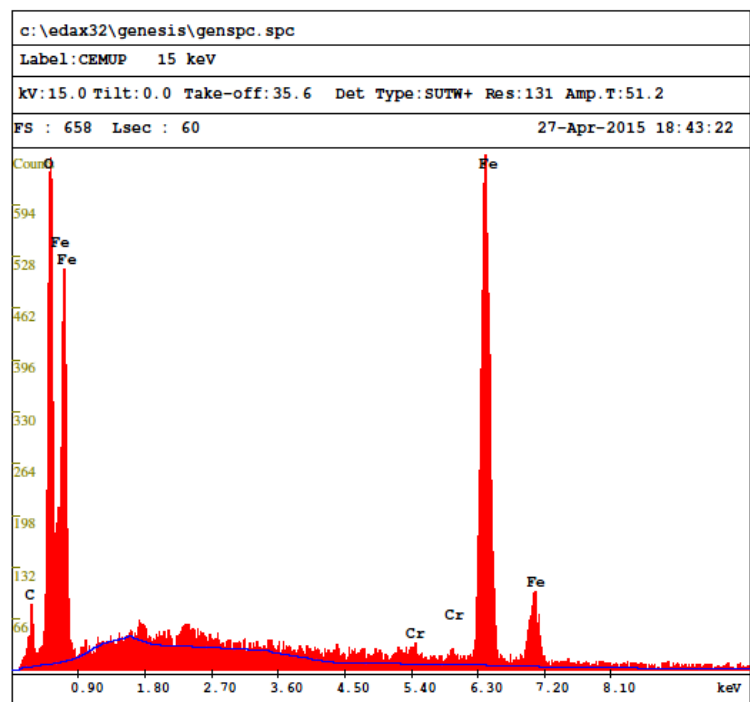


Figura 6.44-Espetro de composição do revestimento da serra Fabricante 3, por análise EDS.

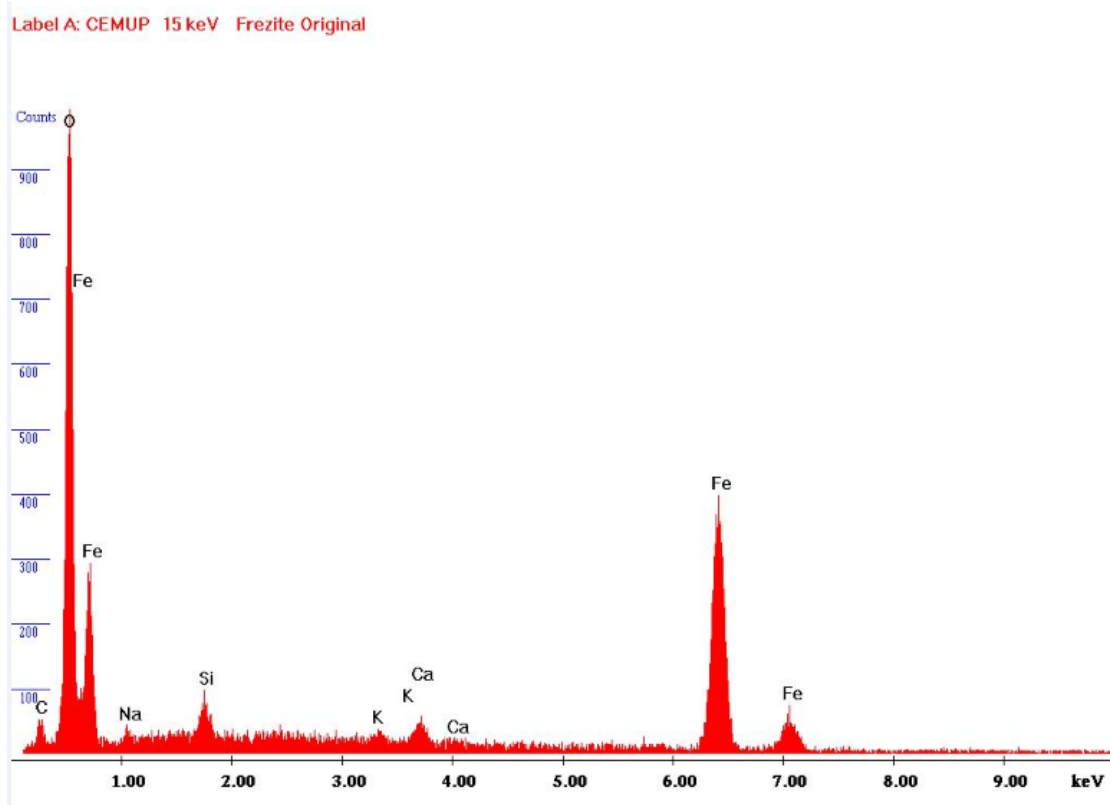


Figura 6.45- Espectro de composição do revestimento da serra FREZITE Original, por análise EDS.

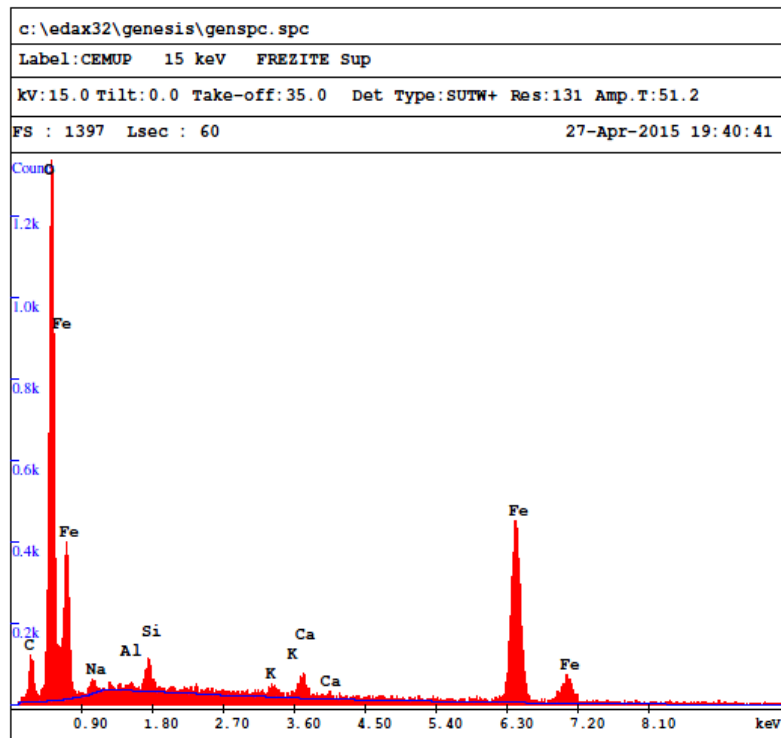


Figura 6.46-Espectro de composição do revestimento da serra FREZITE Nova, por análise EDS.

Em todos os espectros é notória uma concentração superior de Oxigénio (O), principalmente, e de Ferro (Fe) também.

O espectro EDS da superfície do revestimento da serra fina FREZITE Nova é aquele que apresenta um pico de Oxigénio (O) maior comparativamente com as serras finas Fabricante 2 e Fabricante 3, particularmente ao da última.

Suspeita-se que o Cálcio (Ca) e o Potásio (K) presentes no espectro do revestimento da serra fina FREZITE Original provêm da sujidade da superfície.

Na análise do espectro EDS da superfície do revestimento da serra Fabricante 3, o Carbono (C) considera-se contaminação da superfície. O Ferro (Fe) presente nesta análise pertence ao revestimento e ao aço.

6.4.2. Análise da superfície revestida através de SEM

A utilização de microscopia ótica na análise das amostras não permite chegar a qualquer conclusão, em resultado de o tamanho de grão em causa ser demasiado pequeno. Com recurso a microscopia eletrónica de varrimento (SEM) foi possível a obtenção de imagens que permitiram observar com nitidez a distribuição dos grãos da superfície do disco.

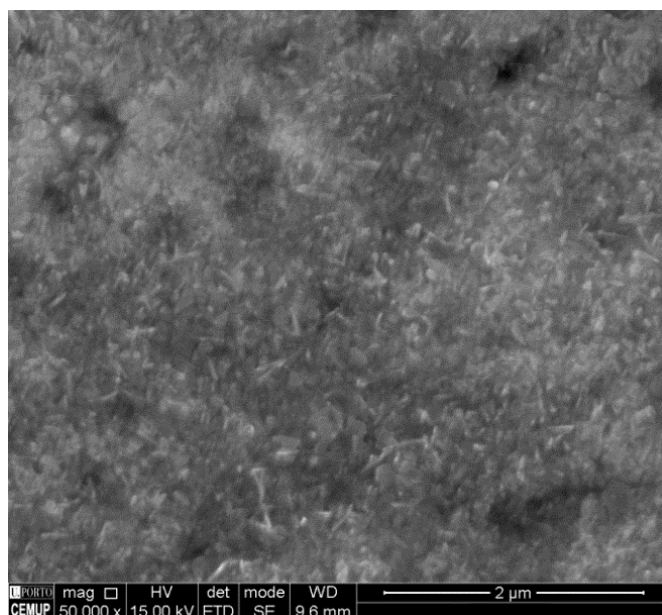


Figura 6.47-Tamanho de grão do óxido da serra Fabricante 2.

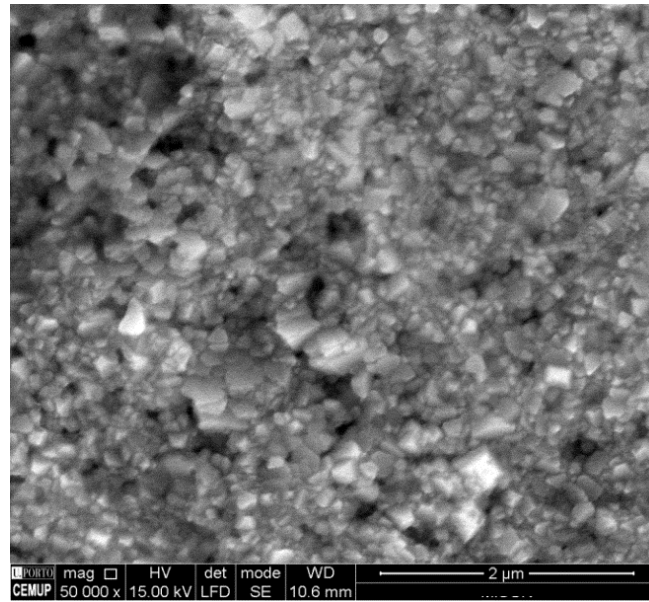


Figura 6.48-Tamanho de grão do óxido de ferro da serra Fabricante 3.

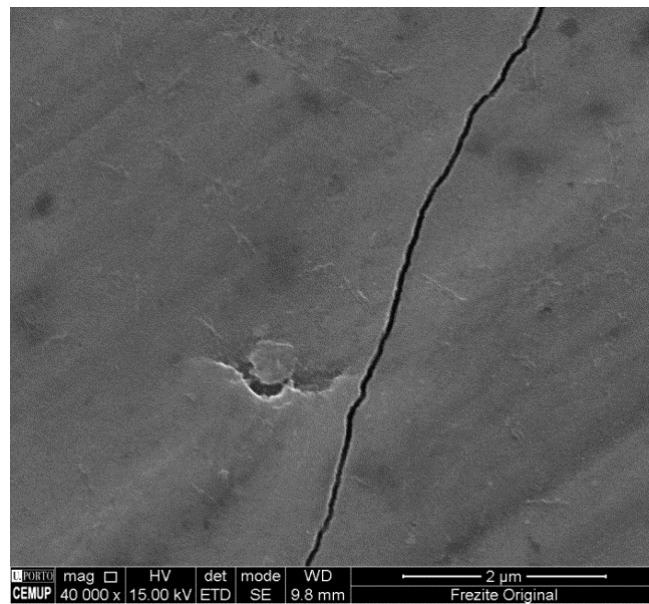


Figura 6.49-Tamanho de grão do óxido da serra FREZITE Original.

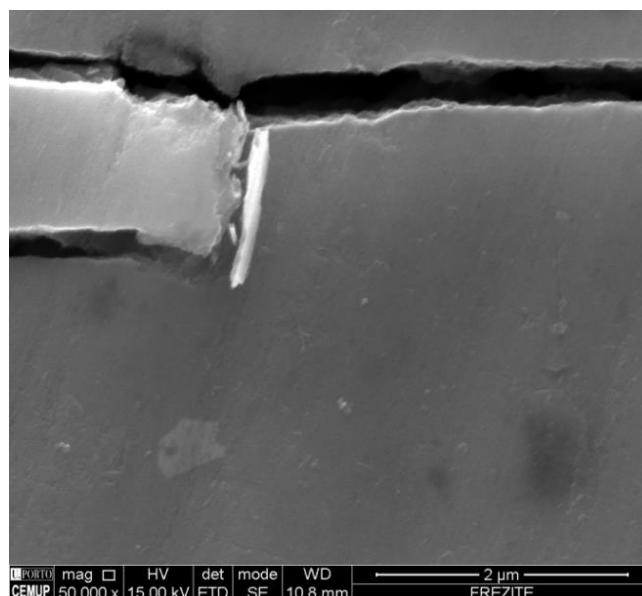


Figura 6.50-Tamanho de grão do óxido da serra FREZITE nova.

A superfície revestida da serra Fabricante 3 apresenta grãos cristalizados de óxido com tamanhos heterogêneos. O tamanho de grão deste revestimento é muito diferente do tamanho de grãos dos óxidos da serra FREZITE Original e FREZITE Nova.

Por sua vez, a superfície revestida da serra Fabricante 2 apresenta um tamanho de grão mais pequeno em relação ao do revestimento da serra Fabricante 3.

6.4.3. Medição da espessura do revestimento

Para conseguir efetuar a medição da espessura do revestimento, foi necessário dobrar amostras do disco das serras; deste modo o revestimento descascava, tornando-se mais evidente a sua distinção relativamente ao substrato. Através de EDS foi possível obter as fotografias apresentadas em seguida.

Fabricante 2

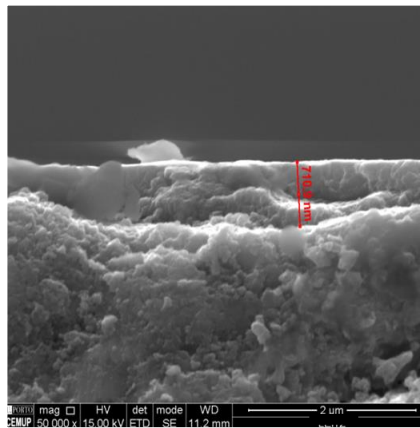
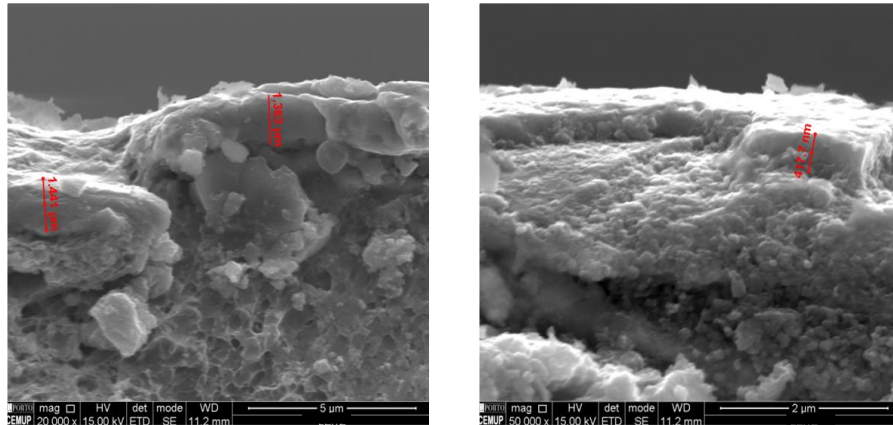


Figura 6.51-Imagem obtida por SEM da zona fraturada do revestimento da serra Fabricante 2.

Fabricante 3

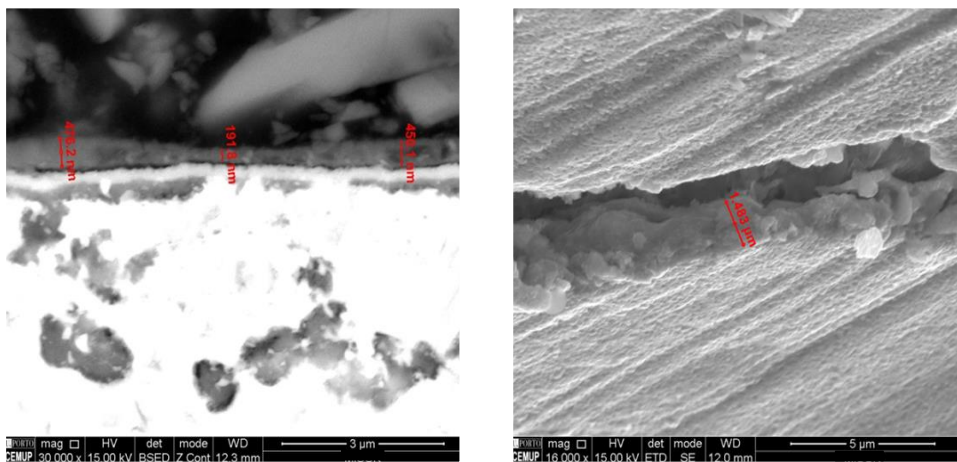


Figura 6.52- Imagem obtida por SEM da zona fraturada do revestimento da serra Fabricante 3.

FREZITE Original

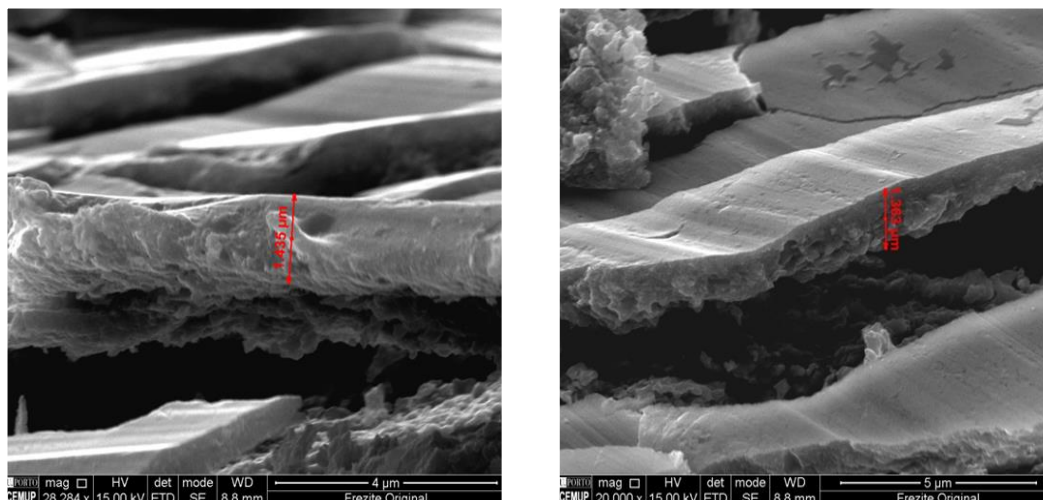


Figura 6.53- Imagem obtida por SEM da zona fraturada do revestimento da serra FREZITE Original.

FREZITE Nova

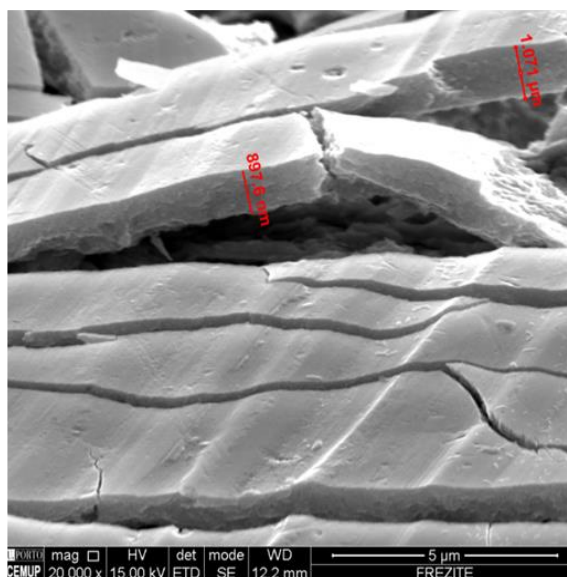


Figura 6.54- Imagem obtida por SEM da zona fraturada do revestimento da serra FREZITE Nova.

Como se pode observar nas Figuras anteriores, os revestimentos têm espessuras muito reduzidas, na ordem dos nanómetros. Apenas o da FREZITE Original apresenta um revestimento na ordem do micron.

Na Tabela 6.9 podem ser observadas as espessuras médias da camada oxidada referente a cada serra fina.

Tabela 6.9-Espessuras médias da camada oxidada de cada serra fina.

Serra	Espessura média (μm)
Fabricante 2	0,983
Fabricante 3	0,650
FREZITE Original	1,399
FREZITE Nova	0,984

6.4.4. Dureza superficial

Na Tabela 6.10 estão representadas as durezas da superfície de cada uma das serras finas. De maneira a obter a dureza em HRC, converteram-se os valores, como representado.

Tabela 6.10 -Dureza da superfície das serras.

Dureza HV 5				
	Fabricante 2	Fabricante 3	FREZITE Original	FREZITE Nova
	456	447	440	447
	453	450	412	432
	463	440	429	440
Média	457	446	427	440
Dureza HRC				
Média	46	45	44	45

Verifica-se que a dureza superficial da serra FREZITE Nova é aproximada da dureza das serras Fabricante 2 e 3, o que indica que os resultados são positivos. Por outro lado, concluiu-se que as durezas medidas correspondem à dureza do aço tratado depois de ir ao forno.

6.4.5. Rugosidade superficial

De maneira a diminuir a aderência da madeira e/ou detritos ao corpo da serra durante o corte de madeira, é necessário ter uma superfície do disco pouco rugosa. Deste modo, procedeu-se à medição de rugosidade do disco de cada uma das serras finas. Assim, foram efetuadas análises dos parâmetros Ra, na direção de maior rugosidade, às serras Fabricante 2, Fabricante 3, FREZITE Original e FREZITE Nova, numa área 0,6x4,8mm. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 6.11.

Tabela 6.11-Rugosidade do corpo das serras finas.

	Fabricante 2	Fabricante 3	FREZITE Original	FREZITE Nova
Ra (µm)	0,227	0,310	0,540	0,211
Comprimento de base “Cut-off”-L (mm)=0,25				

A análise das rugosidades média aritmética (Ra) e representadas na Tabela 6.11 permite constatar que a serra Fina FREZITE Nova apresenta uma superfície com rugosidade inferior, até mesmo menor que as da Fabricante 2 e Fabricante 3, o que poderá estar associado ao facto de ter sofrido um polimento extra da superfície, efetuado com a mó de cortiça já referida anteriormente.

Observando as Figuras 6.55, 6.56, 6.57 e 6.58, percebe-se que a superfície das serras apresenta rugosidade direcional. Isto deve-se à retificação da superfície durante o processo de fabrico das serras.

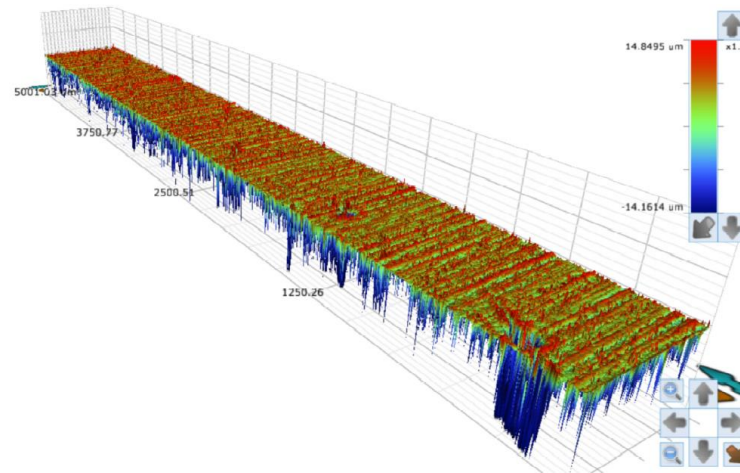


Figura 6.55-Vista 3D da superfície de medição de rugosidade da serra Fabricante 2.

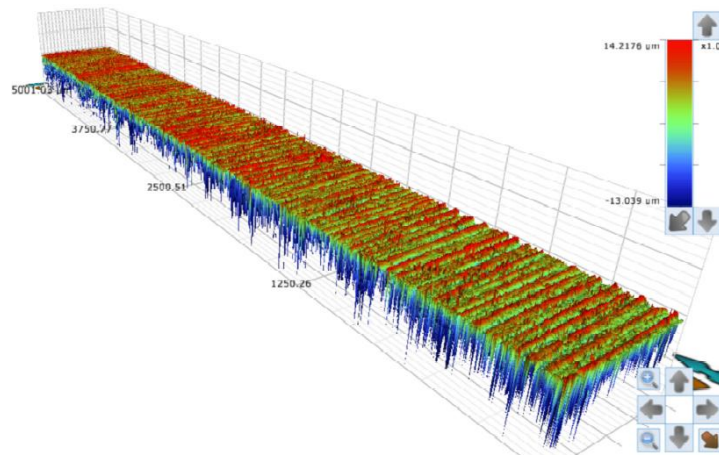


Figura 6.56-Vista 3D da superfície de medição de rugosidade da serra Fabricante 3.

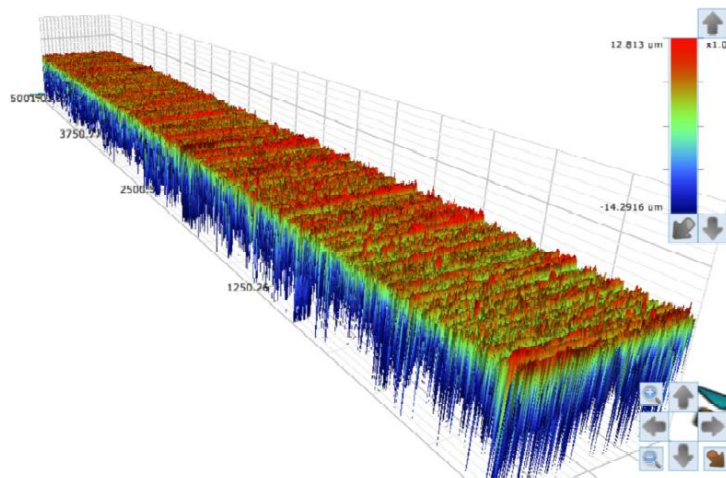


Figura 6.57-Vista 3D da superfície de medição de rugosidade da serra FREZITE Original.

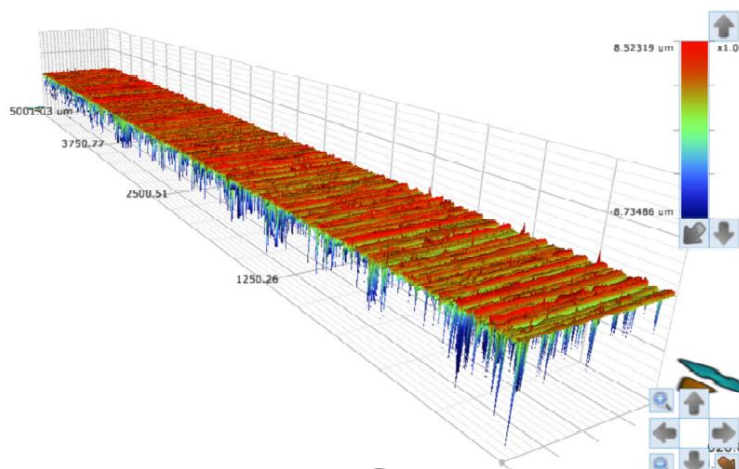


Figura 6.58-Vista 3D da superfície de medição de rugosidade da serra FREZITE Nova.

6.4.5.1. Rugosidade na direção do eixo dos xx

Traçou-se o perfil de rugosidades na direção do eixo dos xx e na direção do eixo dos yy para cada serra, visto que a rugosidade não é semelhante nestas direções, como se constatou nas imagens 3D de cada superfície. Como exemplo, nas Figuras 6.58 e 6.59 estão representados os perfis de rugosidade da serra fina Fabricante 2.

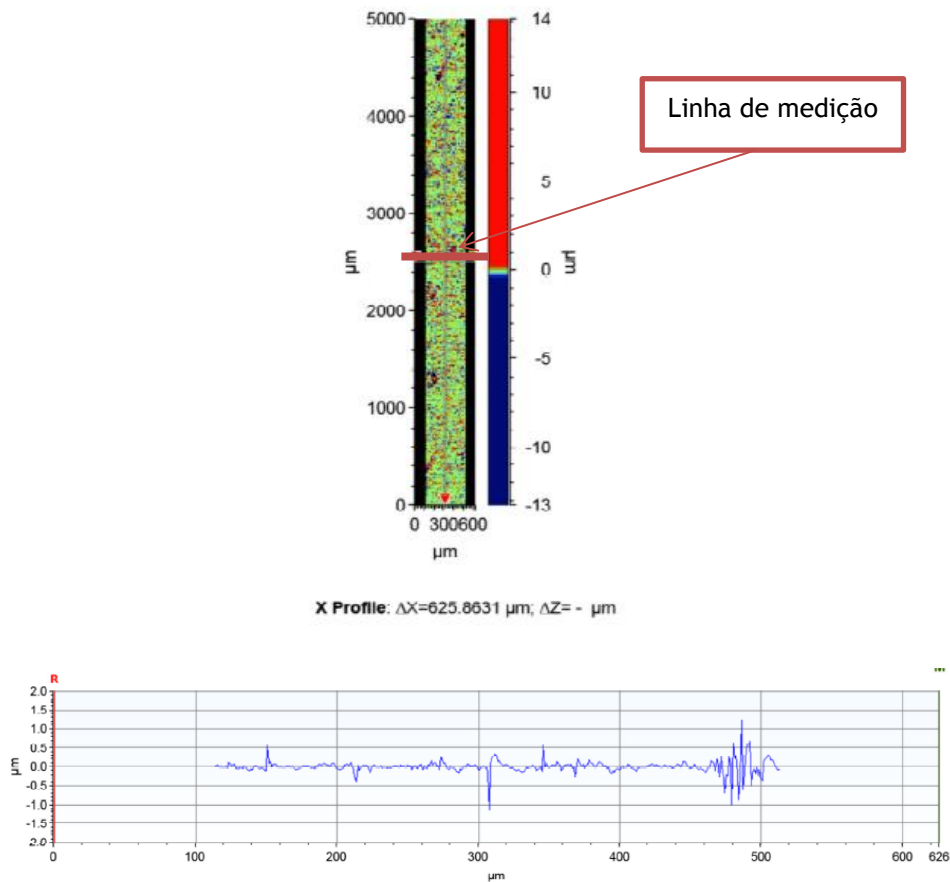


Figura 6.59-Perfil de rugosidade (Ra) na direção do eixo dos xx, da superfície da serra Fabricante 2.

Tabela 6.12 -Parâmetros de rugosidade medidos na direção do eixo dos xx.

	Fabricante 2	Fabricante 3	FREZITE Original	FREZITE Nova
Ra (μm)	0,163	0,165	0,293	0,052
Rmax (μm)	4,527	3,940	5,308	1,200
Rz (μm)	2,553	2,312	3,416	0,561

Comprimento de base “Cut-off”-L (mm) = 0,08

É de referir que uma pequena variação de posição da linha de medição na direção do eixo dos xx altera por completo os valores da rugosidade. Como tal, uma medição de área, como apresentado em 6.4.5. é a melhor alternativa para a medição dos parâmetros de rugosidade.

6.4.5.2. Rugosidade na direção do eixo dos yy

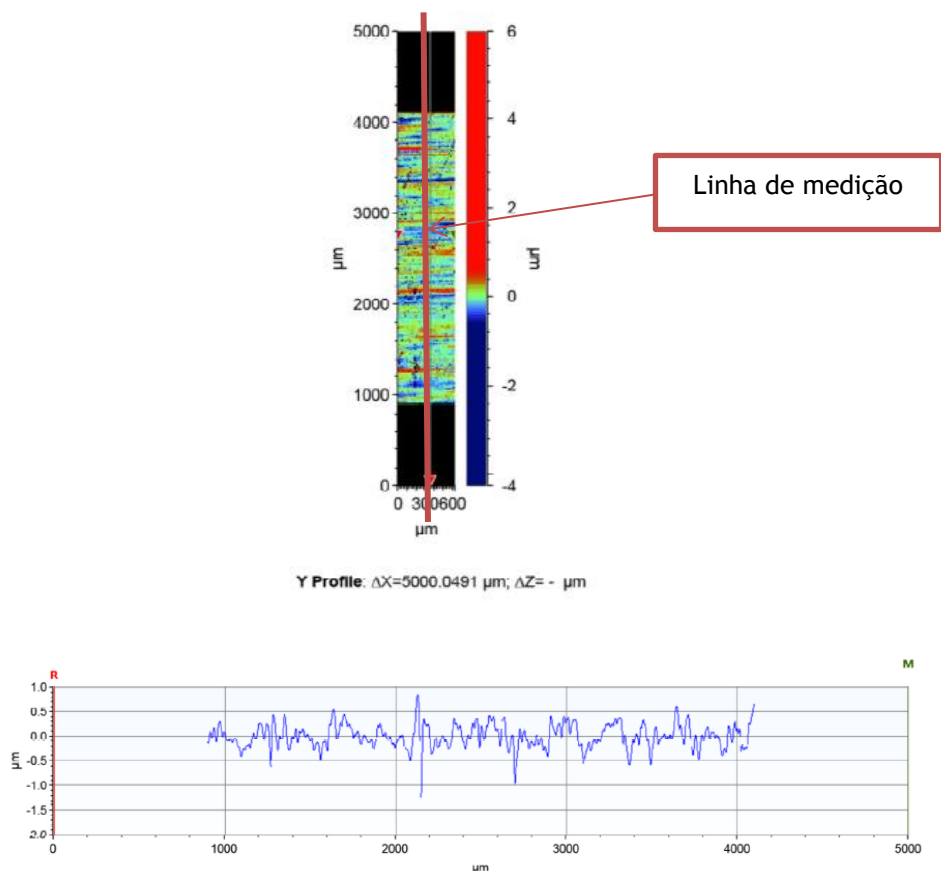


Figura 6.60-Perfil de rugosidade (Ra) na direção do eixo dos yy, da superfície da serra Fabricante 2.

Tabela 6.13-Parâmetros de rugosidade medidos na direção do eixo dos yy.

	Fabricante 2	Fabricante 3	FREZITE Original	FREZITE Nova
Ra (μm)	0,191	0,385	0,420	0,232
Rmax (μm)	1,951	2,506	3,560	1,475
Rz (μm)	1,482	2,110	3,099	1,337

Comprimento de base “Cut-off”-L (mm) = 0,8

No que diz respeito à rugosidade na direção do eixo dos yy, uma variação de posição da linha de medição na direção do eixo dos yy, não altera substancialmente os valores da rugosidade, comprovado durante a medição de rugosidade.

Por fim, com a medição da rugosidade na direção de cada eixo, é evidente uma grande variação da rugosidade consoante a direção.

6.5. Análise da Composição Química do aço das serras Fabricante 2 e Fabricante 3

De maneira a identificar qual o aço das serras Fabricante 2 e Fabricante 3, realizou-se a análise química aos aços destas serras através de espetrometria de emissão ótica.

Em seguida, solicitou-se a uma empresa fornecedora de aços para pesquisar qual o aço mais semelhante aos das referidas serras, pelo que nos indicou o aço 80CrV2.

Numa fase futura ir-se-ia adquirir chapas do aço supramencionado, para assim fabricar uma serra fina para teste.

Capítulo 7

Conclusões

Finalizado este trabalho, que incidiu no estudo de revestimentos do disco de serras circulares de diferentes fabricantes e com base nos resultados obtidos no decurso do mesmo, foi possível obter as seguintes conclusões.

- A serra FREZITE e Fabricante 1 possuem o mesmo revestimento, apesar de terem diferentes espessuras, tratando-se de um revestimento metálico em crómio.
- Um revestimento metálico em crómio, nomeadamente Cromo Duro pode ser utilizado para proteger o disco de serras circulares, aumentando a resistência ao desgaste, sendo também uma alternativa à decapagem com jato de areia.
- No processo de fabrico de serras circulares, o revestimento de Cromo Duro deve ser efetuado após a brasagem das pastilhas de metal duro aos dentes da serra, para assim recobrir a zona oxidada.
- O revestimento de Cromo Duro em comparação com o substrato (aço) possui uma dureza mais elevada.
- Os ensaios de desgaste por esfera rotativa com recurso a pó abrasivo revelaram que o material do revestimento da serra FREZITE Cromo 1 (revestimento de

Cromo Duro) apresenta um comportamento ao desgaste ao nível do material da serra Fabricante 1, líder mundial em serras circulares.

- No que diz respeito às serras finas, na análise do espectro de composição do revestimento das mesmas, concluiu-se que o tratamento térmico é uma Oxidação Negra, devido à presença de oxigénio (O) e Ferro (Fe).
- A superfície revestida da serra Fabricante 3 apresenta grãos cristalizados de óxido com tamanhos heterogéneos. O tamanho de grão deste revestimento é muito diferente do tamanho de grãos dos óxidos da serra FREZITE Original e FREZITE Nova. Prevê-se que o tamanho de grão dos óxidos esteja relacionado com a temperatura de oxidação utilizada no processo de Oxidação Negra.
- Recorrendo a um polimento extra, como efetuado na serra FREZITE Nova, para além da retificação da superfície das serras-etapa do processo de fabrico-, consegue-se uma rugosidade superficial menor ($R_a=0,211\mu\text{m}$) pelo que se prevê a possibilidade de minimizar a aderência de resíduos e resinas provenientes do corte de madeira.

Capítulo 8

Trabalhos Futuros

- Realização de ensaios de nanodurezas, com equipamentos de nanoindentação, de maneira a deduzir a dureza do revestimento de Cromo Duro.
- Realização de ensaios em ambiente real (corte de madeira), de modo a verificar a qualidade do corte obtido após várias melhorias efetuadas nas serras circulares em estudo, bem como a durabilidade das serras.
- Realização de ensaios de corrosão.
- Desenvolvimento e acompanhamento do fabrico de novas serras circulares com outros tipos de revestimento (como por exemplo, o revestimento de ALCRONA), de forma a otimizar o desempenho das serras circulares FREZITE, para corte de madeira.
- Estudo da viabilidade de implementação do processo de eletrodeposição de Cromo Duro na FREZITE.

Referências

1. Group, F. 2015; Disponível em: <http://www.frezitegroup.com/index.php?id=42>. Acedido em 21/02/2015.
2. Castro, A.G.d., *Ciência e tecnologia dos materiais*. 1988, Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. 703 p.-703 p.
3. Ferrolho, C.A.P., *Análise de rendimentos mássicos na indústria de mobiliário*. 2006.
4. COUTINHO, J.d.S., *Materiais de construção 1: Madeiras*. Porto: Universidade do Porto, 1999.
5. Caldas, M., L. Lopes, and J.L. Alves, *PLA recycled and wood- A New Material Combination*. FEUP-Materiais 2015, 2015.
6. Lewis, D.B., S.R. Bradbury, and M. Sarwar, *The effect of substrate surface preparation on the wear and failure modes of TiN coated high speed steel circular saw blades*. *Wear*, 1996. **197**(1-2): p. 82-88.
7. Gonçalves, M.T.T., *Processamento da madeira*. 2000: MTT Gonçalves.
8. Almeida, F.M.F.C.G.d., *Análise comparativa de aços utilizados no fabrico de serras circulares para corte de madeira*. 2014, Porto: FEUP. 1 CD-ROM (73 p.)-1 CD-ROM (73 p.).
9. Bosch. *Acessórios profissionais para ferramentas elétricas* Disponível em: <http://www.bosch-precision.com/pt/pt/technology.html>. Acedido em: 23/02/2015.
10. Wood, V.t., *Circular Saw Selection for Secondary Manufacturing*. 2005.
11. Souza Jr, N.D., *Qualidade de Superfície na Produção de Peças S2S no Setor de Usinagem de uma Indústria de Molduras de Pinus*. Trabalho de conclusão de Curso de Engenharia Madeireira, UFPR, 2009.
12. Frezite-Ferramentas de Corte, S.A. *Catálogo Serras Circulares*. 2014; Disponível em: http://www.frezite.com/docs/catalogo_geral/pt/frezite_01_pt-es/HTML/index.html. Acedido em: 20/02/2015.
13. Davim, J.P., *Princípios da maquinagem*. 1995, Coimbra: Livraria Almedina. 245 p.-245 p.
14. Gonçalves, R.M., *Avaliação do desempenho de ferramentas com diferentes tipos de diamante policristalino*. 2008, Porto: [s. n.]. VII, 52 f.-VII, 52 f.
15. Ferraresi, D., *Usinagem dos metais Dino Ferraresi*. Vol. 1^a. 1970, São Paulo: Editora Edgard Blucher. _ vol.-_ vol.
16. Paiva, A.P.D., *Caraterização do Processo de Fabrico*. Frezite, 2012.
17. Silva, F.J.G.d., *Revestimentos duros ultrafinos executados por P.V.D*. 1997, Porto: [s. n.]. 286 f.-286 f.
18. Le Bourhis, E., et al., *Mechanical properties of hard AlCrN-based coated substrates*. *Surface and Coatings Technology*, 2009. **203**(19): p. 2961-2968.
19. DME. *Revestimentos*. 2013; Disponível em: <http://www.dmeeu.com/files/catalogues/pt/C10.pdf>. Acedido em: 12/03/2015.
20. Horman, I., I. Busuladžić, and E. Azemović, *Temperature Influence on Wear Characteristics and Blunting of the Tool in Continuous Wood Cutting Process*. *Procedia Engineering*, 2014. **69**(0): p. 133-140.

21. Mote, C.D. and R. Szymani, *A review report on principal developments in thin circular saw vibration and control research*. Holz als Roh- und Werkstoff, 1977. **35**(5): p. 189-196.
22. Silva, E., et al., *Revestimentos autolubrificantes de ZrCN para ferramentas de corte*. Ciência & Tecnologia dos Materiais, 2009. **21**: p. 34-44.
23. Silva, F.J.G.d., *Estudo da estrutura e comportamento tribológico de revestimentos duros e ultra-duros executados no vácuo*. 2001, Porto: FEUP. 354 p.-354 p.
24. Holmberg, K. and A. Mathews, *Coatings tribology properties, techniques and applications in surface engineering*. Tribology series. 1994, Amsterdam: Elsevier. 442 p.-442 p.
25. Balzers-Portugal, O. *Oerlikon Balzers define o padrão de referência – mais uma vez*. 2010; Disponível em: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bpt/por/01-products-services/03-coating-technology/indexW3DnavidW261.php>. Acedido em: 10/03/2015.
26. Cardoso, M.M., *Processo Eletrolítico de Cromagem*. Universidade Regional De Blumenau Centro De Ciências Tecnológicas Departamento De Engenharia Química, 2012.
27. Committee, A.I.H., *ASM handbook: Surface engineering*. Vol. 5. 1994: ASM International.
28. Ltda., C.C.D. *O Cromo Duro*. Disponível em: <http://www.cromofix.com.br/ocromoduro.asp>. Acedido em: 12/03/2015.
29. Melo, D.M.d.S., *Aplicação níquel químico*. 2006, Porto: [s. n.]. 17 p.-17 p.
30. Souza, A., Í. Coutinho, and A. Souza, *Revestimentos Superficiais- Tecnologia de Superfícies- Aplicação de Cromo Duro em Ferramentas, Moldes e Matrizes*.
31. Souza, A., Í. Coutinho, and A. Souza, *Revestimentos Superficiais-tecnologia de Superfícies- Aplicação de Cromo Duro em Ferramentas, Moldes e Matrizes*.
32. mbcromoduro, *Cromo Duro*.
33. Chrome, G. *Cromo Duro*. 2015; Disponível em: <http://galvanochrome.pt/>. Acedido em:12/04/2015.
34. Finishing, S. *Níquel Químico*. 2010; Disponível em: <http://www.superfinishing.com.br/niquelquimico.html>. Acedido em: 12/04/2015.
35. Sproul, W.D., *Physical vapor deposition tool coatings*. Surface and Coatings Technology, 1996. **81**(1): p. 1-7.
36. Lin, Y.-J., A. Agrawal, and Y. Fang, *Wear progressions and tool life enhancement with AlCrN coated inserts in high-speed dry and wet steel lathing*. Wear, 2008. **264**(3-4): p. 226-234.
37. Balzers, O., *Apenas alguns milésimos de milímetros fazem toda a diferença*. 2015.
38. Mo, J.L., et al., *Comparison of tribological behaviours of AlCrN and TiAlN coatings— Deposited by physical vapor deposition*. Wear, 2007. **263**(7-12): p. 1423-1429.
39. Balzers, O., *BALINIT® ALCRONA PRO - Um todo-o-terreno ao mais alto nível*. Portugal.
40. Galindo, R.E., et al., *Improving the oxidation resistance of AlCrN coatings by tailoring chromium out-diffusion*. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2010. **65**(11): p. 950-958.
41. Suprimentos, M.e. *O que é revestimento de conversão*. 2015; Disponível em: <http://www.manutencoesuprimentos.com.br/conteudo/6679-o-que-e-revestimento-de-conversao/>. Acedido em: 30/03/2015.
42. Oxide, C.B. 2015; Disponível em: <http://www.clevelandblackoxide.com/what.aspx>. Acedido em: 12/03/2015.
43. Souto, H.I.M., *Laser Cladding: sua aplicação à deposição de revestimentos em lâminas de destroçadores de madeira*. 2013.
44. Mathews, A., et al., *Design aspects for advanced tribological surface coatings*. Surface and Coatings Technology, 1998. **100**: p. 1-6.
45. Tavares, J.M.R.S., *Indicação dos Estados de Superfície CFAC-Conceção e Fabrico Assistido por Computador*, 2007.
46. Morais, J.M.d.S., *Desenho técnico básico*. Desenho de construções mecânicas. Vol. 23ª ed. 2006, Porto: Porto Editora. V, 312 p.-V, 312 p.
47. Balzers, O., *Técnicas de aferição para a garantia da qualidade nos revestimentos BALINIT®*. Portugal.
48. Smith, W.F., *Princípios de ciência e engenharia dos materiais*. Vol. 3.ª ed. 1998, Lisboa: McGraw Hill. XVII, 892 p.-XVII, 892 p.
49. Davim, J.P. and A.G. Magalhães, *Ensaio mecânicos e tecnológicos*. Manuais técnicos. 1992, Aveiro: Estante Editora. 206 p.-206 p.
50. Branco, C.A.G.d.M., *Mecânica dos materiais*. Vol. 2.ª ed. 1994, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. 1098 p.-1098 p.

51. Costa, V.A.C.G.N. and L.M.G.d.S. Rosa, *Crítérios para a identificação dos ensaios e equipamentos mais utilizados na indústria de construção*. 2008, Lisboa: UTL, Instituto Superior Técnico.
52. Milton, O., *Materials Science of Thin Films – Deposition & Structure*, ed. Edição. 1991.
53. Ollendorf, H. and D. Schneider, *A comparative study of adhesion test methods for hard coatings*. Surface and Coatings Technology, 1999. **113**(1–2): p. 86-102.
54. Vidakis, N., A. Antoniadis, and N. Bilalis, *The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds*. Journal of Materials Processing Technology, 2003. **143–144**(0): p. 481-485.
55. Barbosa, A.S.O.Q.F., *Efeito do cromo na microestrutura e no comportamento ao desgaste abrasivo de ferros fundidos*. 2013.
56. -CEMUP, L.d.M.E.d.V.e.M.p.R.X. *Unidade de Imagem, Microestrutura e Microanálise - IMICROS*. Disponível em: http://www.cemup.up.pt/webcemup/IMICROS/IMICROS_lab/IMICROS_lmev.htm. Acedido em:12/05/2015.
57. da Costa, J.D.R., *Estudo e Caracterização de Filmes Finos à base de Nitreto de Crómio*, 2011, Universidade de Coimbra.
58. *Microscopia Eletrónica-SEM, TEM*. 2009; Disponível em: http://fisica.uc.pt/data/20092010/apontamentos/apnt_343_10.pdf. Acedido em:23/05/2015.
59. Bruker. *Medição e análise sem contato de amostras de grandes dimensões*. 2015; Disponível em: <https://www.bruker.com/pt/products/surface-analysis/3d-industrial-optical-microscopy/nplex/overview.html>. Acedido em:09/04/2015.
60. Soares, J.P., *Aços características, tratamentos*. Vol. 6ª ed. atualiz. e aument. 2009, [S.l.]: Ed. do Autor. XX, 370 p.-XX, 370 p.
61. Roberts, G.A. and R.A. Cary, *Tool steels*. Vol. 4th ed. 1980, Ohio: American Society for Metals. XXI, 820 p.-XXI, 820 p.

Anexos

Análise da composição química do aço da serra Fabricante 2 e 3

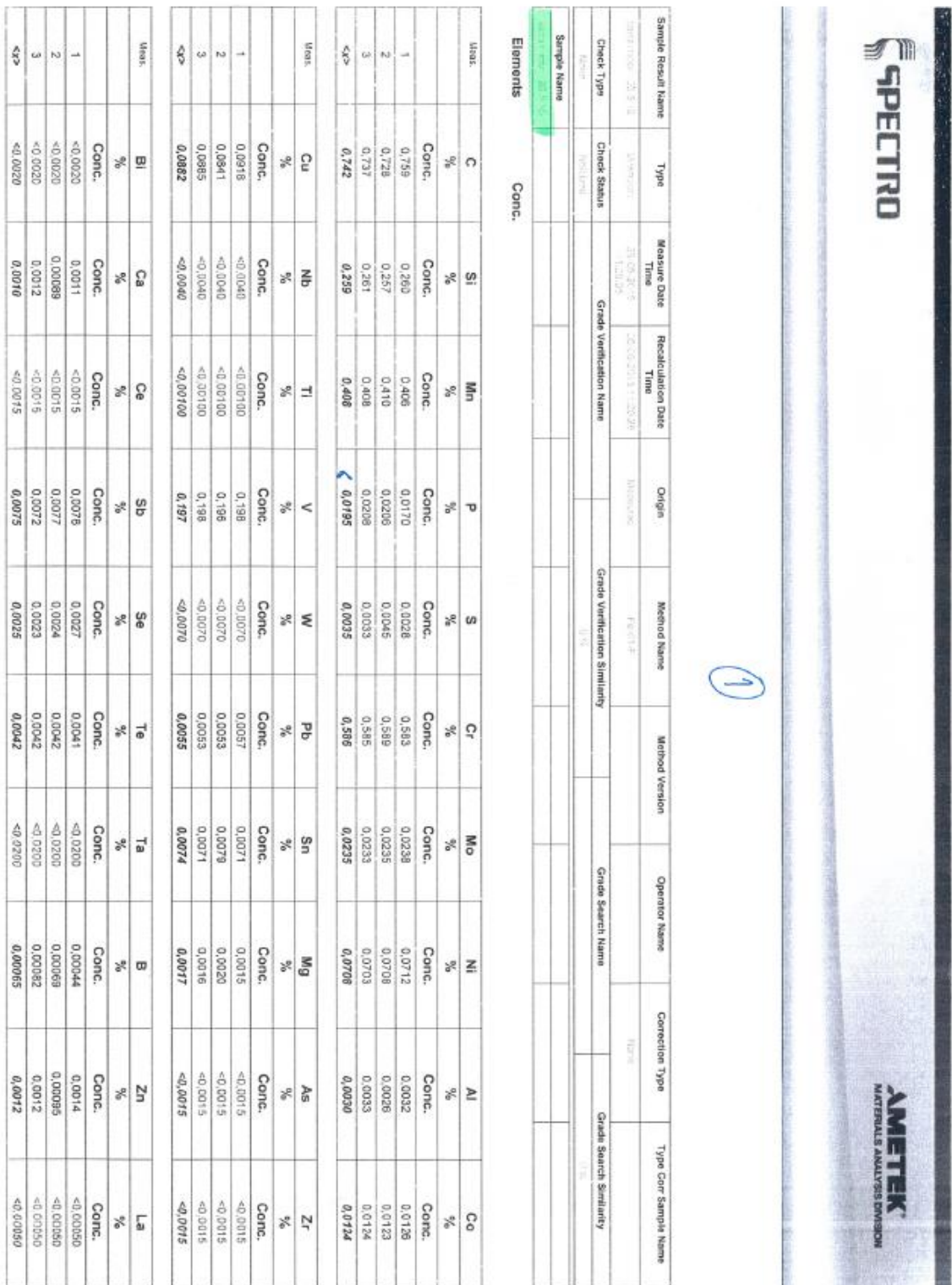


Figura 14.1-Composição química do aço da serra Fabricante 2.

2

Sample Result Name	Type	Measure Date	Recalculation Date	Origin	Method Name	Method Version	Operator Name	Correction Type	Type Corr Sample Name
14797416_293135	UNIFORM	2017-03-15 11:30:27	2017-03-15 11:30:27	BLUESKY	14797416			None	
Check Type	Check Status	Grade Verification Name	Grade Verification Name	Grade Verification Similarity	Grade Search Name	Grade Search Name	Grade Search Name	Grade Search Name	Grade Search Name
None	Met/Pass			1.00					
Sample Name									
None									

Elements

Meas	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.
1	0.795	0.243	0.411	0.0200	0.0036	0.587	0.0230	0.0518	0.0043	0.0117
2	0.735	0.241	0.413	0.0200	0.0036	0.588	0.0226	0.0516	0.0041	0.0113
3	0.721	0.241	0.413	0.0206	0.0036	0.589	0.0224	0.0519	0.0040	0.0109
<x>	0.740	0.242	0.412	0.0202	0.0037	0.588	0.0227	0.0517	0.0041	0.0113

Meas	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Mg	As	Zr
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.
1	0.0718	<0.0040	<0.00100	0.201	<0.0070	0.0049	0.0085	0.0020	<0.0015	<0.0015
2	0.0712	<0.0040	<0.00100	0.200	<0.0070	0.0047	0.0086	0.0018	<0.0015	<0.0015
3	0.0695	<0.0040	<0.00100	0.199	<0.0070	0.0047	0.0088	0.0019	<0.0015	<0.0015
<x>	0.0708	<0.0040	<0.00100	0.200	<0.0070	0.0048	0.0083	0.0019	<0.0015	<0.0015

Meas	Bi	Ca	Ce	Sb	Se	Te	Ta	B	Zn	La
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.
1	<0.0020	0.0010	<0.0015	0.0081	0.0023	0.0041	<0.0030	0.00055	<0.00050	<0.00050
2	<0.0020	0.00082	<0.0015	0.0084	0.0025	0.0041	<0.0030	0.00076	<0.00050	<0.00050
3	<0.0020	0.00075	<0.0015	0.0074	0.0031	0.0043	<0.0030	0.00055	<0.00050	<0.00050
<x>	<0.0020	0.00086	<0.0015	0.0080	0.0026	0.0042	<0.0030	0.00052	<0.00050	<0.00050

Figura 14.2-Composição química do aço da serra Fabricante 3.