

Estudo de uma solução integrada para o corte de rebarba na indústria de pneus

David Oliveira Marques

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Doutor Jorge Lino

Orientador na Continental Mabor: Eng.º Bruno Sousa



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Janeiro 2019

David Oliveira Marques

Email: up201202775@fe.up.pt

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

Porto, Portugal

À minha família e amigos

Resumo

Na indústria de pneus, durante a sua produção, é frequente o aparecimento de excesso de borracha associado a anomalias no funcionamento dos moldes durante a etapa de vulcanização. Devido às exigências dos clientes no setor, torna-se necessário a remoção deste excesso de borracha. Para a sua remoção, são utilizadas ferramentas de corte, compostas por um aço de construção que se desgasta rapidamente. A Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A. propôs a otimização da ferramenta utilizada neste processo, sendo este o principal objetivo desta dissertação.

A realização deste trabalho vem dar continuidade a um trabalho anterior onde foi estudada a viabilidade de aços de ferramentas com maior resistência ao desgaste. Assim, neste trabalho o objetivo passou por utilizar um metal duro, o carboneto de tungsténio. Realizou-se um estudo bibliográfico para entender que fatores tornam o metal duro um melhor material de corte. Analisou-se a borracha dos pneus para entender a razão da sua abrasividade, que faz com que a ferramenta atual se desgaste rapidamente. Efetuaram-se ainda ensaios de dureza ao material, de modo a perceber a diferença para a ferramenta atual. Finalmente, projetou-se uma nova solução construtiva da ferramenta de corte, com o objetivo de diminuir o seu custo e aumentar o tempo de vida, e desenvolveu-se um sistema de afiamento automático para normalizar esta etapa do processo e ter um melhor controlo do tempo de vida da ferramenta.

Concluiu-se que um material de elevada dureza, tamanho de grão pequeno e constituído por carbonetos, tem uma elevada resistência ao desgaste e um bom desempenho de corte. Com a nova ferramenta de corte, fizeram-se testes em ambiente real para entender a melhoria obtida. Os resultados obtidos, em relação ao número de pneus cortados, para a nova ferramenta, foram cerca de 11 vezes superiores ao da ferramenta atual, detetando-se melhoria. À medida que se concluía um teste, alterava-se a ferramenta de corte segundo o *feedback* dos operadores. Com os resultados obtidos e os preços fornecidos, analisou-se a viabilidade económica da nova ferramenta, onde se calculou o custo anual da nova ferramenta, da atual e das testadas no trabalho anterior. Concluiu-se que haveria prejuízo económico com a nova solução e explicou-se a partir de quantos pneus cortados a ferramenta se tornava rentável, e, consequentemente, melhor que a atual. Para alcançar esse objetivo, pediu-se a produção de uma nova ferramenta de corte, alterada conforme o *feedback* dos operadores.

A nova ferramenta de corte permitiu definir um conceito a desenvolver e a otimizar, e com isto chegar à ferramenta ideal, onde o material desperdiçado é baixo e a poupança económica e qualidade de trabalho do operador aumentam.

Development and optimization of a cutting tool of flash in the tires industry

Abstract

In the tire industry, during its production, the excess of rubber is associated with anomalies in the operation of the molds during the vulcanization stage. Due to the requirements of the customers in the industry, it is necessary to remove this excess rubber. For their removal, cutting tools are used, composed of a rapidly wearing engineering steel. The Continental Mabor - Indústria de Pneus S.A. proposed the optimization of the tool used in this process, being this the main objective of this dissertation.

The accomplishment of this work continues a previous work where the feasibility of tool steels with greater resistance to wear was studied. Thus, the goal of this work was the use of the tungsten carbide. A bibliographic study was carried out to understand what factors make the hard metal a better cutting material. The tire rubber was analyzed to understand the reason for its abrasiveness that causes the current tool to wear out so quickly. Yet, hardness tests were done on the material in order to understand the difference from the current tool. Finally, a new constructive solution of the cutting tool was designed with the objective of reducing its cost and increasing the life time and an automatic sharpening system has been developed to standardize this process step and to have a better control of the tool life.

It has been found that a material of high hardness, small grain size and constituted by carbides, has a high resistance to wear and a good cutting performance. With the new cutting tool, tests were done in real environment to understand the improvement obtained. The results obtained, related with the amount of cut tires for the new tool, were about 11 times greater than the current tool, detecting improvement. As a test was completed, the cutting tool was improved according to the feedback from the operators. With the results obtained and the prices provided, the economic viability of the new tool was analyzed by calculating the annual cost of the new tool, the actual tool and the tools used in the previous work. It was concluded that there would be economic loss with the new solution, and it was noticed from how many cut tires began to save, and, consequently, have a better solution. To accomplish that, it was requested the production of a new cutting tool, modified according to the feedback of the operators.

The new cutting tool has made it possible to achieve a concept to be developed and optimized by Continental, thereby reaching the ideal tool where the wasted material is low and the operator's economic saving and quality of work increase.

Agradecimentos

Aproveito para agradecer a todas as pessoas que se cruzaram ao longo deste percurso e que quer de maneira direta ou indireta contribuíram neste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor Jorge Lino, orientador da dissertação na FEUP, por todos os conselhos, disponibilidade demonstrada e o auxílio prestado na realização da mesma.

Ao Engenheiro Bruno Sousa, orientador na Continental, por toda a ajuda disponibilizada, aos momentos de análise e de discussão, troca de opiniões e sugestões e suporte dado ao longo desta dissertação.

À empresa Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A. pela oportunidade de realizar esta dissertação em ambiente empresarial. A todos os colaboradores da Direção de Inovação, pela maneira que me receberam, trataram e acompanharam neste período, ajudando sempre que possível. A todos os operadores e técnicos com quem tive oportunidade de me cruzar, pelo esforço e disponibilidade de me ajudarem e darem um contributo a este trabalho.

À Sr^a Emília Soares e Sr^a Armanda Teixeira pelo auxílio prestado na preparação de amostras.

Ao laboratório de ensaios tecnológicos do DEMec, pelos ensaios de dureza realizados.

Ao CEMUP, e em particular ao Engenheiro Carlos Sá, pela disponibilização de seminários de microscopia eletrónica de varrimento e de análise por Raio-X, bem como na análise de amostras de pneus.

À Frezite, especialmente ao Engenheiro Paulo Esteves e ao Sr^o Francisco Maia, pelo acompanhamento ao longo deste período, pela disponibilidade na ajuda ao desenvolvimento e otimização da ferramenta de corte, bem como a produção de protótipos.

Aos meus amigos, ao Santiago, ao Pedro, ao Luís, ao Manuel, ao Rafael e ao Emanuel, por todos os momentos de companheirismo e descontração. Por todos os desabafos, conversas, palavras de incentivo e ajuda nesta fase.

À Rita, pela paciência, apoio, amor e compreensão demonstrada ao longo deste tempo, mostrando-se sempre presente.

Por fim, um agradecimento muito especial à minha família, sobretudo a mais próxima. Às minhas avós, Ana e Alzira, por todo o apoio, pelos valores que me transmitiram na vida e suporte sempre que necessário. À minha irmã, Ana Rita, pelo carinho e amizade transmitida. Aos meus pais, Joaquim e Rita, por reunirem todas as condições necessárias para que percorresse esta etapa, pelo amor e apoio incondicional ao longo de toda a minha vida, por toda a compreensão, por todos os valores e ensinamentos transmitidos, sem eles nada disto seria possível.

Ao financiamento do projeto NORTE-01-0145-FEDER-000022 – SciTech – Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).



Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto	1
1.2	Continental Mabor	1
1.3	Objetivos do projeto	2
1.4	Metodologia	2
1.5	Estrutura da dissertação	3
2	Estado de Arte	5
2.1	O Pneu	5
2.1.1	História do pneu	5
2.1.2	Componentes de um pneu	5
2.1.3	Materiais	8
2.1.4	Produção de um pneu	13
2.1.5	Formação de rebarba	15
2.2	Mecanismos de corte de rebarba	17
2.3	Desgaste	20
2.4	Materiais para ferramentas de corte	22
2.4.1	Fatores que influenciam o desempenho da ferramenta de corte	23
2.4.2	Revestimentos	25
2.5	Carboneto de Tungsténio	26
2.5.1	Produção	27
2.5.2	Propriedades mecânicas	31
2.5.3	Classificação	34
2.6	Afiamento de ferramentas	36
3	Procedimento experimental	41
3.1	Análise à ferramenta de corte atual	42
3.2	Análise ao composto de borracha	44
3.3	Análise de dureza ao carboneto de tungsténio	45
3.4	Teste em ambiente real	46
4	Desenvolvimento e otimização do processo de corte	47
4.1	Soluções para a ferramenta de corte	47
4.2	Solução para o afiamento	50
5	Análise e discussão de resultados	63
5.1	Análise ao composto de borracha	63
5.2	Análise de dureza ao carboneto de tungsténio	64
5.3	Teste em ambiente real	64
6	Viabilidade económica da solução	67
7	Conclusões e propostas de trabalho futuro	71
7.1	Conclusões	71
7.2	Trabalhos futuros	72
	Referências	73
	ANEXO A: Desenho técnico das ferramentas de corte	77
	ANEXO B: Desenho técnico e dados técnicos dos componentes da máquina de afiamento	80

Símbolos e abreviaturas

8D- Método de resolução de problemas do Programa PDC

AISI- *American Iron and Steel Institute*

BA- Butiraldeído anilina

BB- Borracha de Polibutadieno

BC- Borracha de Cloropeno

BEB- Borracha de Estireno Butadieno

BEP- Borracha de Etileno Propileno

BI- Borracha de Poliisopreno

BII- Borracha de Isobuteno-Isopreno

BN- Borracha Natural

CBS- N-ciclohexil benzotiazil sulfenamida

CEMUP- Centro de Materiais da Universidade do Porto

CVD- *Chemical Vapor Deposition* (Deposição química de vapor)

DBTU- Difenil tioureia

DCBS – N-diciclohexil-2-benzotiazol sulfenamida

DIN- Norma da *German Institute for Standardization*

DOTG- Di-orto-tolilguanidina

DPG- Difenilguanidina

DPTU- Dibutil tioureia

ET- Etileno tioureia

HIP- *Hot Isostatic Pressing* (Prensagem isostática a quente)

HMT- Hexametenetetramina

ISO- Norma da *International Organization for Standardization*

MBS – 2-(4-tiomorfolina) benzotiazol

MBTS- Dissulfureto de dibenzotiazilo

MEBT- Mercaptobenzotiazol

PDC- Programa Prevenir, Detetar e Corrigir utilizado pela Continental

PLT- *Passenger and Light Truck*

PVD- *Physical Vapor Deposition* (Deposição física de vapor)

SEM- *Scanning Electric Microscopy* (Microscopia eletrónica de varrimento)

TBBS – N-tert-util-2-benzotiazol sulfenamida

TMTD- Dissulfureto de tetrametil tiurame~

TMTM- Monossulfureto de tetrametil tiurame

WC- Carboneto de Tungsténio

ZBDT- Dibutil ditiofosfato de zinco
ZBEC- Ditiocarbamato de dibenzilo e zinco
ZDBC- Ditiocarbamato dibutílico de zinco
ZDEC- Dietil ditiocarbamato de zinco
ZDMC- Ditiocarbamato de dimetilo e zinco
ZIX- Xantato de isopropilo e zinco
ZMBT- Mercaptobenzotiazolato de zinco
 σ - Tensão normal
 τ - Tensão de corte

Índice de Figuras

Figura 1- Imagem aérea da Continental Mabor (RACE 2018)	1
Figura 2- Método de resolução 8D (System 2014)	2
Figura 3- Relatório resumo do método 8D (Figura 2) (System 2014)	3
Figura 4- Componentes de um pneu (AG 2013)	6
Figura 5- Detalhe do piso do pneu (AG 2013)	6
Figura 6- Detalhe <i>cap plie</i> de um pneu (AG 2013)	6
Figura 7- Detalhe do filamento metálico do breaker (AG 2013)	7
Figura 8- Detalhe da tela de um pneu (AG 2013)	7
Figura 9- Detalhe da <i>inner line</i> de um pneu (AG 2013).....	7
Figura 10- Detalhe da parede lateral de um pneu (AG 2013)	7
Figura 11- Detalhe do <i>flipper</i> de um pneu (AG 2013)	8
Figura 12- Detalhe da cunha de um pneu (AG 2013).....	8
Figura 13- Detalhe do talão de um pneu (AG 2013).....	8
Figura 14- Composição de um pneu (AG 2013)	9
Figura 15- Constituição de um composto de borracha	10
Figura 16- Propriedades mecânicas das borrachas em função do teor de negro de fumo (Silva 2013)	11
Figura 17- Processo de produção de um pneu (AG 2013)	14
Figura 18- Variação das propriedades do composto com a qualidade da vulcanização (Coran 2013).....	15
Figura 19- Prensa de vulcanização (Mesnac 2018)	15
Figura 20- Molde de vulcanização de um pneu (adaptado de (Mesnac 2018)).....	16
Figura 21- Zonas de formação de rebarba num pneu (adaptado de (AG 2013)).....	17
Figura 22- Exemplos de tipos de rebarba existentes: a) Zona do ombro; b) Zona do talão; c) Zona do piso; d) Zona de saídas de ar	17
Figura 23- Taxa de remoção de material pelo método a laser (Eckert and Vollertsen 2018) ..	18
Figura 24- Método de acabamento rotacional (Azami, Azizi, and Khoshanjam 2018)	18
Figura 25- Método de acabamento magnético abrasivo (Li et al. 2018).....	19
Figura 26- Método de acabamento vibratório (Hashimoto, Johnson, and Chaudhari 2016)....	19
Figura 27- Exemplos de ferramentas utilizadas no corte de rebarba.....	20
Figura 28- Tipos de desgaste por abrasão (Vicente 2016)	20
Figura 29- Idealização do desgaste abrasivo (Moore 1978).....	21
Figura 30- Variação da profundidade da cratera com a percentagem de partículas abrasivas (Binder, Klocke, and Doeblener 2017).....	21
Figura 31- Imagens de amostras obtidas num microscópio eletrónico (SEM) de um aço ferrítico-perlítico após desgaste (Binder, Klocke, and Doeblener 2017)	21

Figura 32- Variação da taxa de remoção de material com a pressão de contacto (Sarkar 1976a).....	22
Figura 33- Coeficiente de atrito do carboneto de tungsténio em meio de nitreto de zircónio (Valerini et al. 2013).....	22
Figura 34- Ferramentas de corte constituídas por diferentes tamanhos de grão (Hock 2010).....	24
Figura 35- Propriedades mecânicas de um aço austenítico com diferentes tamanhos de grão (Yuan et al. 2014).....	25
Figura 36- Durezas pós tratamento PVD (Paskvale 2007).....	25
Figura 37- Dureza vs Tenacidade entre carbonetos sinterizados e outros materiais (Materials 2009)	26
Figura 38- Esquema do processo comum de produção de WC (Durit 2017).....	27
Figura 39- Esquema de compactação de pós numa prensa uniaxial (Ferreira 2002)	28
Figura 40- Revestimentos para WC (Durit 2017)	31
Figura 41- Classificação do tamanho de grão (Sandvik 2012).....	31
Figura 42- Dureza em função do tamanho de grão e conteúdo de cobalto (Upadhyaya 1998).....	32
Figura 43- Tensão de rutura transversal em função da % de Co para três tamanhos de grão (Eisen 1998).....	32
Figura 44- Efeito do cobalto na dureza e na TRT (Eisen 1998).....	33
Figura 45- Tenacidade em função do tamanho de grão e da quantidade de cobalto (Eisen 1998).....	33
Figura 46- Processo de geração de raios de Ar^+ para afiamento (Sato et al. 2011).....	36
Figura 47- Método de afiamento por raios de Ar^+ : a) Morfologia da aresta de corte; b) Variação do ângulo de corte com a tensão (Sato et al. 2011).....	36
Figura 48- Processo de afiamento eletroquímico (Jain and Pathak 2017)	37
Figura 49- Esquema representativo do processo de afiamento por esmeril (Bhowmik and Naik 2018).....	37
Figura 50- Dureza dos abrasivos utilizados no afiamento por esmeril (Rowe 2014).....	38
Figura 51- Coeficiente de atrito para diferentes velocidades de rotação (Gu et al. 2015)	38
Figura 52- Aumento da temperatura para diferentes velocidades de rotação (Gu et al. 2015).....	39
Figura 53- Etapas do procedimento experimental.....	41
Figura 54- Aspetos da ferramenta após diferentes etapas de produção (Correia 2018).....	42
Figura 55- Esquema de operação da ferramenta de corte: a) Para as zonas do talão, saídas de ar e piso; b) Para a zona do ombro	43
Figura 56- Imagens de microscópio ótico de amostras da ferramenta de corte antes (esquerda) e depois (direita) do ataque químico: a) nova; b) usada (Correia 2018)	43
Figura 57- Radiações emitidas pela amostra num microscópio SEM.....	45
Figura 58- Durómetro Die Testor 2 RC presente no laboratório de ensaios tecnológicos do DEMec.....	45

Figura 59- Método de utilização da nova ferramenta de corte: a) Para as zonas do talão, saídas de ar e piso; b) Para a zona do ombro.....	46
Figura 60- Protótipo da ferramenta de corte com lâmina inferior	48
Figura 61- Protótipo da ferramenta de corte com lâmina superior.....	48
Figura 62- Primeiro protótipo produzido pela Frezite.....	49
Figura 63- Primeiro protótipo produzido pela Frezite com as primeiras alterações	49
Figura 64- Primeiro protótipo produzido pela Frezite com as segundas alterações.....	49
Figura 65- Esquema da máquina de afiamento	50
Figura 66- Dimensões de correias e polias segundo a Dunlop (Dunlop 2016).....	51
Figura 67- Dimensões característica para veios e chavetas (Morais 2012).....	52
Figura 68- Esforços que o veio da mó está sujeito	53
Figura 69- Diagrama de momentos do veio da mó (Software 2013)	53
Figura 70- Fatores radial e axial dos rolamentos fixos de esferas (catálogo SKF (SKF 2015))	54
Figura 71- Esquema representativo das dimensões de um rolamento (SKF 2015).....	55
Figura 72- Flecha dos veios: a) da mó; b) do motor (Software 2013)	56
Figura 73- Gráfico para a obtenção de C2 (Castro 2014).....	57
Figura 74- Gráfico para a obtenção de C3 (Castro 2014).....	57
Figura 75- Fator de concentração de tensões teórico para uma solicitação de flexão em função (Castro 2014).....	58
Figura 76- Veio motor montado	59
Figura 77- Veio da mó montado.....	60
Figura 78- Máquina de afiamento: a) Vista frontal; b) Vista superior; c) Vista Lateral; d) Vista isométrica	61
Figura 79- Imagens de amostras de rebarba por SEM (Ampliação: 1000x; Energia do feixe de elétrons: 15000 kV): a) Pneu de Inverno; b) Pneu de Verão	63
Figura 80- Ferramentas de corte utilizadas no teste em ambiente real: a) Teste 1; b) Teste 2	65
Figura 81- Gráfico da poupança anual em função dos pneus cortados entre afiamentos pela nova ferramenta de corte.....	69
Figura 82- Desenho Técnico da ferramenta de corte atual.....	77
Figura 83- Primeiro protótipo desenvolvido pela Frezite.....	78
Figura 84- Desenho técnico do protótipo mais recente	79
Figura 85- Tabela técnica do motor ALTA - 0063 M1 - 10002- IZ (Ltd)	80
Figura 86- Desenho técnico da embraiagem (McMaster-Carr 2013).....	81
Figura 87- Dados técnicos do rolamento 61812 (SKF 2015).....	81
Figura 88- Desenho Técnico do rolamento	81
Figura 89- Desenho técnico do veio da mó	81
Figura 90- Desenho Técnico do veio do motor	81

Figura 91- Desenho Técnico da caixa	81
---	----

Índice de Tabelas

Tabela 1- Classificação dos aceleradores (Group 2010)	12
Tabela 2- Composição química e dureza dos aços analisados na dissertação anterior (Correia 2018)	23
Tabela 3- Dureza de carbonetos (García et al. 2019)	24
Tabela 4- Propriedades mecânicas de um aço austenítico com diferentes tamanhos de grão (Yuan et al. 2014)	24
Tabela 5- Efeito do tamanho de grão e quantidade de cobalto nas propriedades mecânicas (Ferraresi 1986)	34
Tabela 6- Efeito dos elementos nas propriedades mecânicas (Ferraresi 1986)	34
Tabela 7- Composições químicas e propriedades físicas segundo a norma ISO (Davim 2008)	34
Tabela 8- Aplicabilidade dos carbonetos sinterizados segundo a norma ISO (Davim 2008, Trent and Wright 2000)	35
Tabela 9- Seleção de abrasivos (Lawson 2003)	39
Tabela 10- Composição química do aço CK 45 segundo a norma AISI (Aços 2016) e o fornecedor (Correia 2018)	42
Tabela 11- Análise da composição química do aço utilizado na ferramenta de corte atual (Correia 2018)	44
Tabela 12- Durezas das amostras da ferramenta de corte atual (Correia 2018)	44
Tabela 13- Dimensões das características das correias e polias escolhidas (Dunlop 2016)	51
Tabela 14- Determinação dos diâmetros mínimos dos veios (critério de rigidez)	52
Tabela 15- Tensão de cedência do aço C3 (Aços 2016)	52
Tabela 16- Parâmetros para a definição do comprimento mínimo da chaveta (Morais 2012)	53
Tabela 17- Escolha das chavetas (Morais 2012)	53
Tabela 18- Dimensionamento do rolamento 61806	55
Tabela 19- Dimensionamento do rolamento 61810	55
Tabela 20- Dimensionamento do rolamento 61812	55
Tabela 21- Características do rolamento 61812 (SKF 2015)	55
Tabela 22- Resultados da análise à fadiga	59
Tabela 23- Valor de dureza do carboneto de tungstênio comparado com a ferramenta de corte atual	64
Tabela 24- Resultados dos testes em ambiente real	64
Tabela 25- Custos associados às ferramentas de corte	67
Tabela 26- Custo das ferramentas de corte por pneu	68

Tabela 27- Viabilidade económica da nova ferramenta de corte	68
Tabela 28- Previsão da viabilidade económica da nova ferramenta de corte com a atual e a dissertação anterior (Correia 2018)	69

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto

A presente dissertação, realizada em ambiente empresarial, tem como tema o desenvolvimento e otimização de uma ferramenta de corte de rebarba gerada nos pneus, utilizada na unidade PLT (*Passenger and Light Truck*) da empresa Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A., e foi desenvolvida com a colaboração do Departamento de Inovação.

Enquadra-se no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, na especialização de Produção, Conceção e Fabrico.

1.2 Continental Mabor

A Continental Mabor surge em 1989, quando a Mabor, devido à falta de competitividade, teve necessidade de uma revitalização, tendo-se juntado à empresa alemã Continental AG. A Mabor era uma empresa de manufatura de borracha, de renome nacional e a Continental AG uma empresa de dimensão mundial. A nova empresa, Continental Mabor, Indústria de Pneus, S.A. (Figura 1), veio dar resposta à produção nacional (Automóvel 2015).

Em 1993, a Continental assume o controlo total da Continental Mabor. O crescimento foi muito significativo, sendo que no início eram produzidos 5000 pneus por dia, enquanto que atualmente são produzidos cerca de 60000 pneus diariamente, sendo uma das fábricas do grupo Continental com maiores índices de produtividade. Emprega cerca de 2000 trabalhadores e é uma das maiores exportadoras nacionais (Negócios 2018, Correia 2018).



Figura 1- Imagem aérea da Continental Mabor (RACE 2018)

No final da produção, todos os pneus são inspecionados, surgindo na maior parte deles uma rebarba (flash) que necessita de ser removida por uma ferramenta de corte para que o produto final tenha a qualidade desejada para a empresa. Esta ferramenta sofre desgaste e necessita de ser afiada. Este processo é manual e depende do operador, o que conduz a um tempo de vida útil baixo. Assim, o processo de corte de rebarba do pneu acarreta custos, não acrescentando valor ao produto final, uma vez que se trata de uma operação que visa melhorar o aspeto estético do mesmo. Desta forma, torna-se indispensável minimizar os custos associados a esta etapa, otimizando a ferramenta de corte, quer do ponto de vista da operação (diminuindo o tempo que um pneu demora a ser inspecionado e cortado) quer do ponto de vista do investimento em equipamento (custo de aquisição do equipamento/número de cortes com o equipamento).

Como estas ferramentas são utilizadas diária e continuamente, também se pretende uma melhoria ergonómica da mesma, o que provocaria um aumento da qualidade de trabalho e a prevenção de lesões.

1.3 Objetivos do projeto

Com este projeto pretende-se:

- Redução de custos associados à operação de corte de rebarba;
- Redução do impacto ambiental decorrente deste processo (utilização de materiais reciclados, matérias-primas sustentáveis, etc.);
- Implementação de melhorias no processo de afiamento da ferramenta de corte;
- Redução da ineficiência produtiva decorrente da operação de corte do flash.

1.4 Metodologia

A metodologia utilizada, enquadra-se numa abordagem PDC, composta por 3 fases: Prevenir, Detetar e Corrigir (PDC), devidamente suportadas por ferramentas de aplicação prática e orientadas à melhoria da eficiência e eficácia (Figura 2). Por fim, é necessário Atuar.

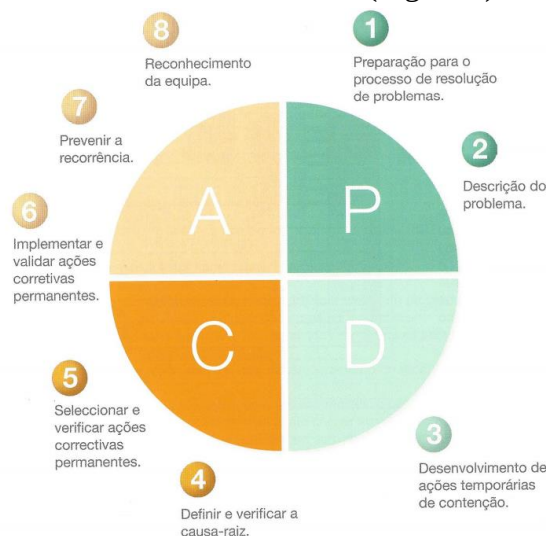


Figura 2- Método de resolução 8D (System 2014)

Inicialmente é necessário procurar informação essencial para o êxito na melhoria, numa fase ainda de definição do processo. De seguida, identificar as causas do problema e avaliar o seu impacto, eliminar o erro humano e analisar o risco/falhas na melhoria. De modo a perceber melhor o problema, é necessário monitorizá-lo e recolher os dados por métodos

estatísticos, para posteriormente reduzi-los. Por fim, corrigir e avaliar a melhoria. Resumidamente, é necessário preencher o relatório apresentado na Figura 3, onde se responde aos 5 W's e 2 H's (*What, why, where, when, who, how much/many, how does it happen*).

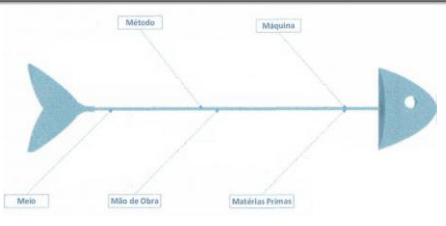
Descrição do problema	Plano de implementação
Análise do problema	Resultados obtidos
	
	Passos seguintes

Figura 3- Relatório resumo do método 8D (Figura 2) (System 2014)

Esta dissertação resulta da continuação de um trabalho realizado anteriormente (Correia 2018). Nesta dissertação do MIEM, a ferramenta de corte foi otimizada utilizando aços por pulverometalurgia, de construção, de trabalho a frio e inoxidáveis. Tendo em conta os resultados obtidos nesse trabalho, procurou-se agora alcançar ciclos de vida da ferramenta ainda mais longos. Assim, iniciou-se a metodologia pela seleção de carboneto de tungsténio para a ferramenta, após uma abordagem teórica sobre outros materiais usualmente utilizados em ferramentas de corte, o material a cortar (composto de borracha) e os mecanismos de desgaste.

Foi proposta uma solução construtiva para uma nova ferramenta de corte, onde era possível implementar lâminas em carboneto de tungsténio. Os protótipos foram desenvolvidos e fabricados sendo testados em ambiente real e analisados em laboratório.

Para além do material e de uma solução construtiva, foi projetada uma máquina de afiamento automático, após análise teórica dos tipos de afiamento utilizados e suas características.

A partir dos resultados dos testes, foi elaborada uma análise estatística e de viabilidade económica da nova solução.

1.5 Estrutura da dissertação

A dissertação está estruturada em 7 capítulos e contém anexos.

No presente capítulo (capítulo 1), é feita uma introdução ao projeto, descrevendo a motivação, os objetivos, a metodologia e a empresa.

No capítulo 2 aborda-se a pesquisa efetuada, iniciando com a produção do pneu e consequente formação de rebarba. É analisada a composição do pneu e posteriormente é feita análise do material a cortar (composto de borracha) e os métodos de remoção. De seguida é analisado o desgaste em ferramentas de corte, e os materiais mais utilizados nas mesmas, com abordagem aos fatores que influenciam as propriedades destes (composição química, microestrutura e tratamentos). Por fim, faz-se uma abordagem aos tipos de afiamento de ferramenta de corte utilizados.

No capítulo 3 apresenta-se a análise feita à ferramenta atual, desde a sua produção, dureza e microestrutura. Também se fez uma análise de dureza ao carboneto de tungsténio utilizado na nova solução da ferramenta de corte e uma breve análise da borracha dos pneus que irá ser cortada.

No capítulo 4 descreve-se o desenvolvimento e otimização da ferramenta de corte, onde se inclui o desenvolvimento do novo projeto, a apresentação do mesmo à empresa que irá produzir a ferramenta (Frezite) e a descrição sequencial dos protótipos produzidos. Também se projetou uma máquina automática de afiamento. Foi feito o devido dimensionamento para a construção de máquinas.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados dos testes realizados com os diferentes protótipos produzidos.

No capítulo 6 analisa-se o ganho económico da nova ferramenta de corte, tendo em conta os resultados apresentados durante a presente dissertação.

Por fim, no último capítulo, é feita a apreciação global do trabalho, apresentando as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, de modo a prosseguir com o trabalho desenvolvido.

2 Estado de Arte

De modo a iniciar o método PDC de melhoria, iniciou-se a dissertação com uma introdução teórica, fazendo uma análise bibliográfica do problema e de métodos de solução.

2.1 O Pneu

Para contextualizar a problemática, fez-se uma abordagem ao pneu, desde a sua história até aos materiais usados e a sua produção.

2.1.1 História do pneu

Tudo começou em 1888 quando o veterinário e inventor escocês, Jonh Boyd Dunlop, desenvolveu o primeiro pneu com câmara-de-ar para a bicicleta do seu filho. Antes disso, as rodas eram feitas de madeira, ferro ou materiais compostos, o que tornava a condução difícil e desconfortável.

De modo a resolver o problema da trepidação, Dunlop, inflou alguns tubos de látex através de uma bomba de ar. De seguida envolveu os tubos com uma lona para proteger e colocou em volta da roda do triciclo. Esta invenção distinguiu-se pelo facto de o pneu deixar de ser maciço. Desenvolveu-se então uma patente de um pneu com câmara-de-ar para bicicleta (Negócios 2018).

Em 1898 a Continental começou a produzir o chamado “pneu pneumático” para carros ligeiros. Desde então, até aos dias de hoje, foram feitos avanços notáveis nos aspetos técnicos do pneu, desde do formato do padrão do piso até à sua composição que origina a sua cor preta. O pneu atual é capaz de suportar velocidades elevadas, com elevada aderência mesmo em situações de baixo atrito, o que permite um nível alto de segurança (AG 2013).

2.1.2 Componentes de um pneu

O pneu é um componente técnico complexo de um veículo automóvel com várias funções. Este deve ser capaz de ter amortecimento, assegurar uma boa estabilidade direcional e garantir um serviço de longo prazo. O mais importante é a sua capacidade de transmitir elevadas forças longitudinais e laterais durante as travagens, acelerações e manobras de modo a garantir uma perfeita aderência à estrada, quaisquer que sejam as suas condições. A segurança tem o papel mais importante no desenvolvimento do pneu.

Um pneu é dividido em várias partes, cada uma com a sua função e material. A Figura 4 permite uma melhor compreensão, onde é possível ver em detalhe as diferentes partes do pneu e onde se situam. A vermelho encontram-se identificadas essas partes. É de salientar que os componentes de 1 a 3 representam o conjunto do piso/cinta e os componentes de 4 a 9 representam o conjunto da carcaça. O pneu em questão é um modelo específico da Continental (AG 2013).



Figura 4- Componentes de um pneu (AG 2013)

Com os componentes identificados, é possível reconhecer os diferentes materiais utilizados, que se encontram na seguinte lista:

1. **Piso** – É constituído por três partes: a capa, a base e o ombro (Figura 5). Feito de borracha natural e sintética:

Capa: assegura a aderência em toda a superfície da estrada, permite a selagem à água, e a estabilidade direcional;

Base: reduz o atrito e protege a carcaça;

Ombro: permite uma ligação ótima entre o piso e a parede lateral.

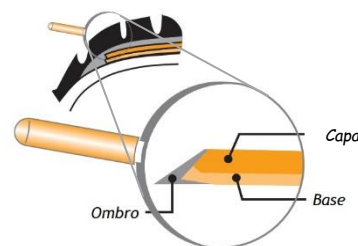


Figura 5- Detalhe do piso do pneu (AG 2013)

2. **Cap Plie** – Garante que o pneu se adequa a altas velocidades (Figura 6). É feito de nylon envolvido em borracha.

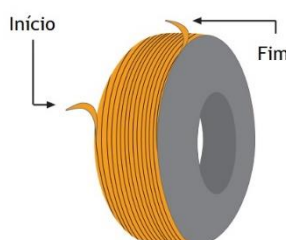


Figura 6- Detalhe cap plie de um pneu (AG 2013)

3. **Breaker ou cinta metálica** – Ajuda a manter a forma do pneu, a estabilidade direcional, reduz o atrito e aumenta a quilometragem máxima (Figura 7). É feito de cordas de aço de alta resistência impregnadas em borracha.

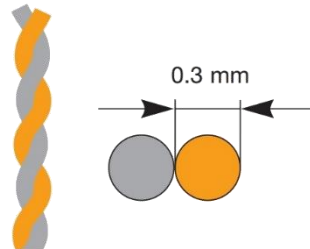


Figura 7- Detalhe do filamento metálico do breaker (AG 2013)

4. **Tela** – Controla a pressão interna e mantém a forma do pneu (Figura 8). É feita de *Rayon* ou poliéster (têxtil) impregnado em borracha.



Figura 8- Detalhe da tela de um pneu (AG 2013)

5. **Inner Liner** – Sela o pneu (Figura 9). É feita de borracha de Butil.



Figura 9- Detalhe da *inner line* de um pneu (AG 2013)

6. **Parede Lateral** – Protege o pneu de danos laterais e das condições atmosféricas (Figura 10). É feita de borracha natural e sintética.

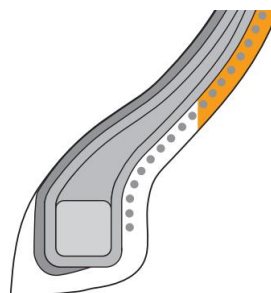


Figura 10- Detalhe da parede lateral de um pneu (AG 2013)

7. **Flipper** – Ajuda à estabilidade direcional e aumenta a precisão da condução (Figura 11). É feito de nylon e aramida.

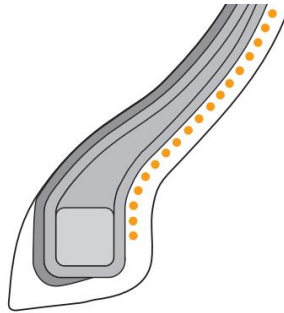


Figura 11- Detalhe do *flipper* de um pneu (AG 2013)

8. **Cunha** – Ajuda à estabilidade direcional, aumenta a precisão da condução e o conforto (Figura 12). É feito de borracha sintética.

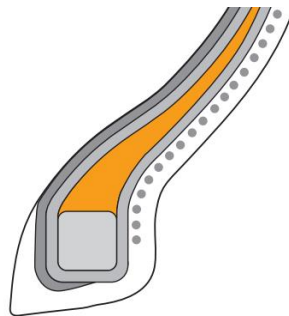


Figura 12- Detalhe da cunha de um pneu (AG 2013)

9. **Talão** – Assegura que o pneu assenta precisamente na jante (Figura 13). É feito de cabos de aço, a laranja, envolvidos por borracha, a cinzento.

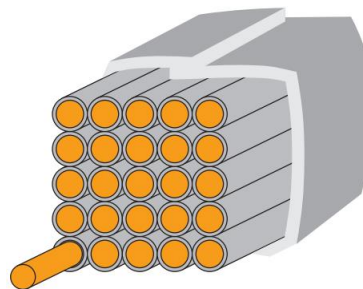


Figura 13- Detalhe do talão de um pneu (AG 2013)

2.1.3 Materiais

Os componentes de um pneu são de vários materiais, tal como foi descrito. A quantidade de material utilizada depende do pneu, e na Figura 14 é exemplificada a composição de um pneu específico da Continental. Como é possível verificar, o pneu é constituído maioritariamente por borracha (cerca de 41%), quer natural, quer sintética. Para além disso, também é constituído por materiais de reforço (aço e têxtil) e produtos químicos com diferentes funções.

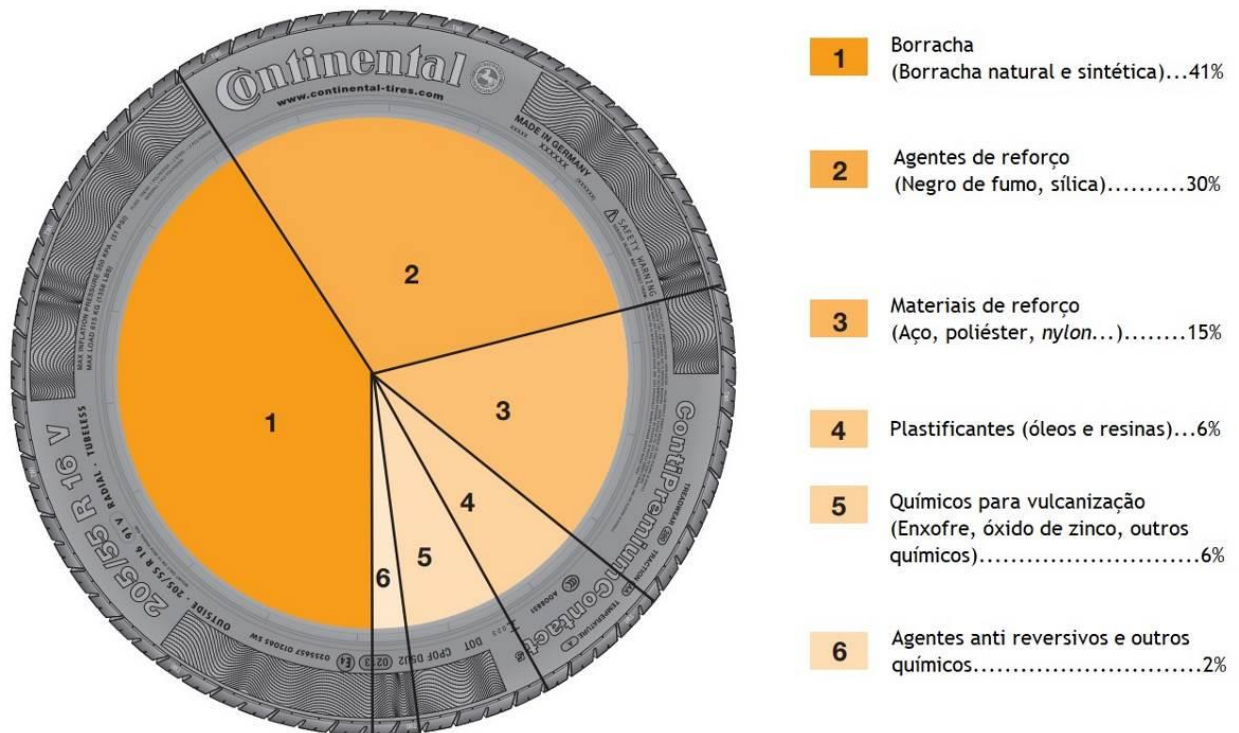


Figura 14- Composição de um pneu (AG 2013)

Assim, diferentes indústrias estão envolvidas na produção do pneu. A indústria metalúrgica que fornece os aços; a indústria química que fornece, por exemplo, a borracha sintética; a indústria têxtil que fornece os diferentes têxteis; e a indústria da borracha natural (AG 2013).

Ao que anteriormente chamamos borracha, é na realidade um conjunto de matérias-primas que formam um composto de borracha (Caetano 2014). Daí, cerca de 85% do pneu é feito de composto de borracha. De seguida será feita a sua descrição.

2.1.3.1 Composto de Borracha

Os elastómeros ou borrachas são longas cadeias de polímeros que apresentam grande capacidade de deformação quando sujeitos a tensões mais ou menos elevadas, conseguindo recuperar rapidamente logo que se retira a tensão. As ligações entre as cadeias são em pequena quantidade e de baixa resistência (Silva 2013).

A classificação das borrachas pode ser feita pela sua capacidade de serem vulcanizadas ou não por adição de aceleradores, sendo saturadas ou insaturadas, respetivamente (Hamed 2012). Podem também ser divididas em dois tipos: termoendurecíveis e termoplásticas (Silva 2013).

Os compostos de borrachas vulcanizadas são utilizados em engenharia devidos às suas propriedades de deformação elástica, absorção de vibrações, tenacidade e resistência à abrasão (Silva 2013). A produção de um composto de borracha requer um processo que inclui a mistura, conformação a alta pressão e vulcanização. É no último passo deste processo que as propriedades físicas e químicas desejadas são atribuídas (Sommer 2009), sendo, portanto, uma etapa que varia com a finalidade da borracha e onde surge a problemática desta dissertação, tal como será visto no capítulo 2.1.5.

Os compostos de borracha são constituídos por 5 grupos diferentes, cada um com a sua função, como pode ser visto na Figura 15.

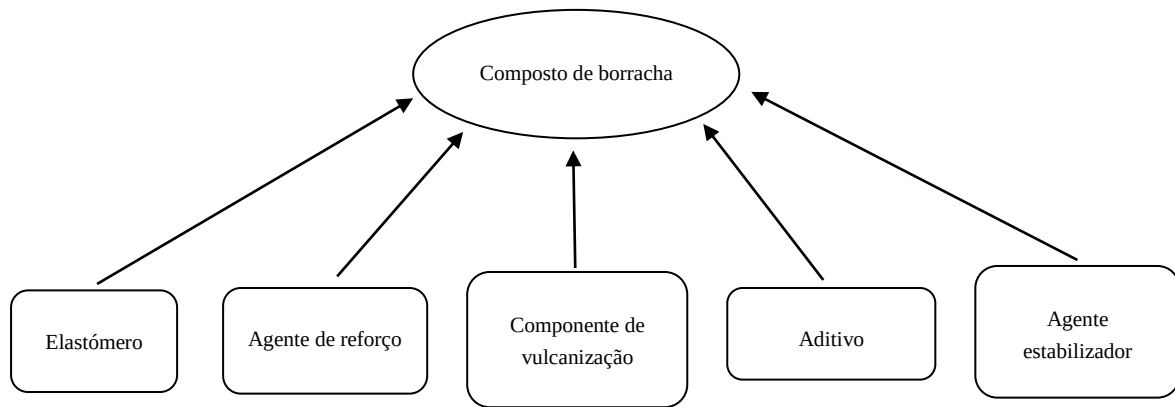


Figura 15- Constituição de um composto de borracha

Os elastômeros mais utilizados na produção de um pneu são os seguintes:

Borracha natural

A borracha natural (BN), sendo a única existente durante muitos anos, foi sujeita a um intenso desenvolvimento. É produzida do látex da árvore *Hevea Brasiliensis*. É o mais versátil dos elastômeros, com boas propriedades mecânicas, como resistência à tração, elevada elasticidade, desenvolvimento de pouco calor, resistência à fluência e ao arrancamento. Oferece boa aderência entre componentes. A resistência à oxidação e ataque por ozono é fraca (Silva 2013). Antigamente, as paredes laterais e o piso eram feitos desta borracha, no entanto, atualmente esta borracha é misturada com borracha sintética para melhorar as suas propriedades (Heisler 2002).

Borracha sintética

Ao contrário da borracha natural, a borracha sintética pode ser feita a partir da polimerização de diversos monómeros. A mistura destes monómeros é feita em diversas proporções de modo a obter as propriedades desejadas (Blogspot 2010). De todas as borrachas sintéticas, distinguem-se as mais utilizadas na produção de um pneu:

- Borracha de estireno butadieno (BEB): é a borracha mais utilizada na indústria dos pneus. É muito resistente ao desgaste, mas tem baixa resistência ao rasgamento. Um facto interessante desta borracha é a grande absorção de energia e baixa resiliência. Estas propriedades conferem excelente aderência, especialmente em superfícies molhadas. É utilizada essencialmente no piso, enquanto que nas paredes laterais do pneu é utilizada uma mistura desta borracha com borracha natural (Heisler 2002).
- Borracha de poliisopreno (BI): tem características semelhantes à borracha natural, tendo menor desgaste, maior resistência ao rasgamento e ao desgaste. É interessante para a produção do piso do pneu com altas taxas de resistência à abrasão. Trata-se de uma borracha adequada para pneus de veículos de trabalhos pesados, como tratores (Hamed 2012, Heisler 2002).
- Borracha de polibutadieno (BB): é uma borracha com boa resistência ao desgaste e com bastante tolerância às variações de temperatura. Tem alta resiliência. Normalmente é misturada com BEB, BN e BI para produzir os pisos de pneus com alta resistência à abrasão (Heisler 2002, Hamed 2012).

- Borracha de etileno propileno (BEP): a grande vantagem desta borracha é a grande compatibilidade com o negro de fumo e óleo. Tem excelentes propriedades abrasivas e resistência ao ozono. A sua desvantagem é a fraca adesão a produtos têxteis (Heisler 2002).
- Borracha de cloropreno (BC): tem uma resistência ao desgaste e ao rasgamento médias, e uma boa aderência à superfície. O maior inconveniente é a falta de capacidade de aderir à carcaça do pneu, tendo de ser colocado uma faixa de BN entre os componentes. Tem uma baixa permeabilidade a gases. Normalmente utilizada na cobertura das paredes laterais, misturada com BN (Heisler 2002).
- Borracha de isobuteno-isopreno (BII): tem baixa permeabilidade aos gases, sendo utilizada nas *liners*, boa resistência ao desgaste e resiliência e um comportamento perto do plástico. Boa aderência quer em condições secas quer molhadas. Devido à sua boa absorção ao choque permite reduzir o ruído do pneu durante a sua utilização (Heisler 2002, Hamed 2012).

Agente de reforço

Outro grupo que faz parte do composto são os agentes de reforço, como o negro de fumo e a sílica. Estas substâncias podem reforçar a nível estrutural ou superficial. Normalmente, este reforço aumenta a força das ligações da borracha. O tamanho das partículas destas substâncias tem influência nas propriedades da borracha. Os agentes de reforço melhoram as propriedades, tais como a resistência ao desgaste, à abrasão e ao rasgamento. Na Figura 16 é possível observar-se a variação das propriedades mecânicas do composto, com o teor de negro de fumo (Sommer 2009).

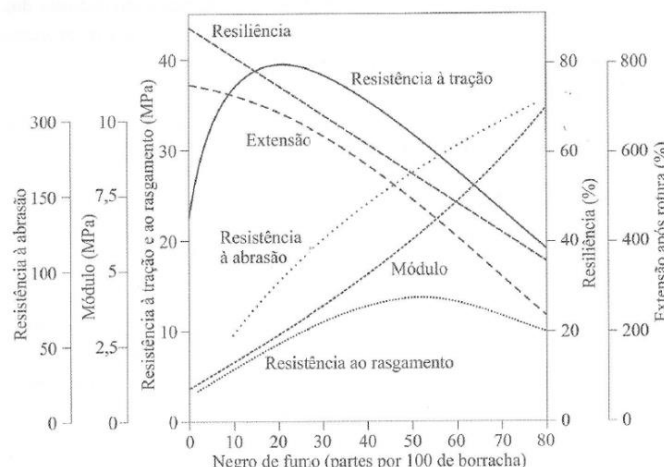


Figura 16- Propriedades mecânicas das borrachas em função do teor de negro de fumo (Silva 2013)

Como se verifica, a resiliência e a extensão diminuem com o aumento do negro de fumo enquanto que o módulo e a resistência à abrasão aumentam. A resistência à tração e ao rasgamento aumentam até certo ponto, diminuindo a partir do mesmo.

Componente de vulcanização

Outros ingredientes utilizados, são os componentes de vulcanização. Podem ser agentes de vulcanização, ativadores, aceleradores e retardadores/anti reversivos.

Os agentes de vulcanização têm como objetivo melhorar as propriedades da borracha durante o processo de mistura. O mais utilizado é o enxofre, mas também podem ser utilizados o selênio e o telúrio.

Os ativadores têm como objetivo o melhoramento das propriedades físicas finais do composto, quando combinados com os aceleradores. Os mais utilizados são o óxido de zinco e ácido esteárico, porque a sua capacidade de formar um complexo de enxofre é elevada, e assim a energia utilizada para a iniciação da vulcanização é menor.

Os aceleradores são utilizados para aumentar a taxa de vulcanização, diminuindo a energia gasta na mesma. Podem ser classificados de duas maneiras: taxa de vulcanização ou grupo químico. Alguns aceleradores podem ser verificados na Tabela 1.

Tabela 1- Classificação dos aceleradores (Group 2010)

Aceleradores	Grupo Químico	Velocidade de Vulcanização
BA, HMT	Aldehyde Amine	Lenta
DPG, DOTG	Guanidine	Lenta
MEBT, MBTS, ZMBT	Thiazole	Semi Ultra Rápida
ZBDP	Thiophosphate	Ultra Rápida
CBS, TBBS, MBS, DCBS	Sulfenamides	Ação Rápida com atraso
ET, DPTU, DBTU	Thiourea	Ultra Rápida
TMTM, TMTD	Thiuram	Ultra Rápida
ZMDC, ZDEC, ZDBC, ZBEC	Dithiocarbamate	Ultra Rápida
ZIX	Xanthates	Ultra Rápida

Alguns fatores de escolha dos aceleradores são o tipo de elastômero, tipo e quantidade de óxido de zinco ou ácido esteárico, taxa de vulcanização desejada, resistência à fadiga desejada e as condições da vulcanização.

Os retardadores/anti reversivos podem ser usados para aumentar a resistência à queima. Como atualmente se requer um tempo muito rápido de vulcanização para o composto ser rapidamente produzido, é necessária a sua utilização (Group 2010, Rodgers and Waddell 2013a).

Aditivo

Podem ser óleos de processamento que servem essencialmente para ajudar o processo. Diminuem a viscosidade do composto, o que diminui a energia de produção gasta (Rodgers and Waddell 2013a, Hamed 2012).

Os plastificantes também são utilizados, como os ésteres, alcatrão de pinho e polietileno de baixo peso molecular. Aumentam o poder de adesão, resistência ao calor e resistência à fadiga (Rodgers and Waddell 2013a).

Também se usa peptizadores químicos, pois baixam a viscosidade do composto. Os mais utilizados são o fenilidrazina e o sulfeto de difenila (Rodgers and Waddell 2013a, Hamed 2012).

As resinas podem funcionar como agentes de reforço ou de adesão. Aumentam a resistência à tração, a resistência à fadiga e diminuem a taxa de propagação das fendas. Podem ser hidrocarbonetos, resinas de petróleo ou resinas fenólicas.

Também são utilizadas fibras curtas, porque aumentam as forças de ligação do composto. Assim, aumenta a resistência à tração, à fadiga, à propagação das fendas e a rigidez. As mais utilizadas são o *nylon*, o poliéster, fibra de vidro, aramida e celulose (Rodgers and Waddell 2013a).

Agentes estabilizadores

Os agentes estabilizadores dividem-se em antioxidantes e antiozonantes. Estes têm um processo de seleção, que depende da sua volatilidade, solubilidade, estabilidade química, concentração, segurança ambiental e para a saúde. Portanto, quer-se um anti degradante pouco volátil, solúvel, estável, que necessite de pouca concentração na mistura, e que seja amigo do ambiente e da saúde. Os antiozonantes protegem o composto do ataque do ozono, protegendo-o do desenvolvimento de fendas. Os antioxidantes protegem o composto do ataque do oxigénio, impedindo a deterioração do composto, uma vez que a oxidação é acelerada pelo calor, o que tornaria o processo de vulcanização problemático. Os anti degradantes mais usados são as aminas, fenólicos, fosfitos e ceras misturadas com alceno ou isoalceno (Rodgers and Waddell 2013a, Hamed 2012).

Conclui-se que, de facto, o pneu é composto por vários componentes com diferentes materiais, como o composto de borracha e os materiais de reforço. Foi dada ênfase à constituição do composto de borracha, pois este será o material que a ferramenta de corte desenvolvida terá de cortar. De seguida, será abordada a produção de um pneu, onde surge a problemática desta dissertação.

2.1.4 Produção de um pneu

Após o conhecimento dos componentes e dos materiais utilizados num pneu, é necessário abordar a produção do mesmo.

O processo de um pneu é dividido em várias etapas, cada uma com o propósito da produção dos diferentes componentes do pneu, que se juntam ao longo do processo até ao produto final. Essencialmente, divide-se em 6 etapas: mistura dos elastómeros, agentes de reforço e os diferentes químicos para formar o composto; processamento dos têxteis e fabrico das cordas de aço envolvidas em borracha; extrusão do piso, paredes laterais e outros componentes; junção dos diferentes componentes; vulcanização; inspeção final e expedição (Rodgers and Waddell 2013b).

De todas estas etapas, as que têm maior relevância nesta dissertação são a vulcanização, pois é nesta etapa que surge a rebarba, e a inspeção final, uma vez que é aqui que se usa a ferramenta de corte

A vulcanização, outrora cura, tem como principal objetivo transformar a borracha em bruto num material elástico e particularmente estável e tornar as suas propriedades independentes da temperatura, tornando-as insolúveis em líquidos (Silva 2013). Sobre altas pressões e temperaturas, é dada a forma ao pneu, formando o padrão do piso e dando a espessura requerida.

Durante a inspeção final, verifica-se o produto final. O pneu deve ter ultrapassado todas a etapas do processo, os componentes devem estar devidamente unidos e o pneu deve ter a devida qualidade e desempenho (Rodgers and Waddell 2013b).

Como já foi dito, é nestas duas etapas que surge o problema a resolver nesta dissertação, o que será explicado de seguida. Na Figura 17 encontra-se um diagrama explicativo de todo o processo de produção do pneu.

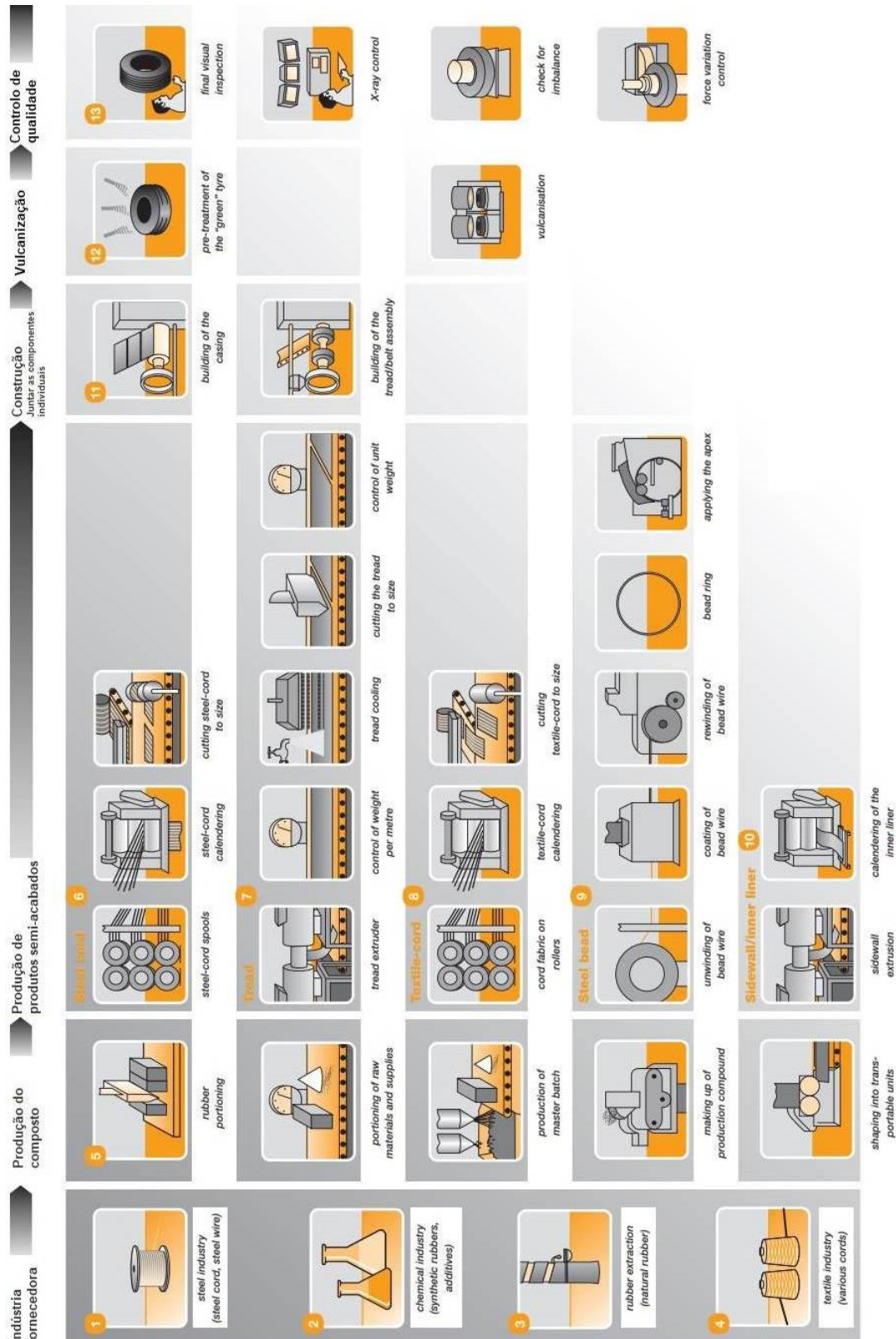


Figura 17- Processo de produção de um pneu (AG 2013)

2.1.5 Formação de rebarba

No processo de vulcanização dá-se, por vezes, a formação de uma rebarba indesejável para o pneu final. De seguida será explicado em pormenor todo este processo.

A penúltima etapa de produção de um pneu é a vulcanização, onde se transforma um pneu “verde” no pneu quase final. Pode ser definida como o método de aumentar a elasticidade e diminuir a plasticidade. Isto implica a formação de ligações moleculares mais fortes. Sendo assim, a vulcanização é o processo de produção de uma rede de ligações químicas através da formação de cadeias poliméricas. Tudo isto, devido ao aquecimento a altas pressões, com ajuda dos agentes de vulcanização. A Figura 18 apresenta a variação das propriedades com a variação no número de ligações cruzadas, ou seja, com a qualidade da vulcanização (Coran 2013).

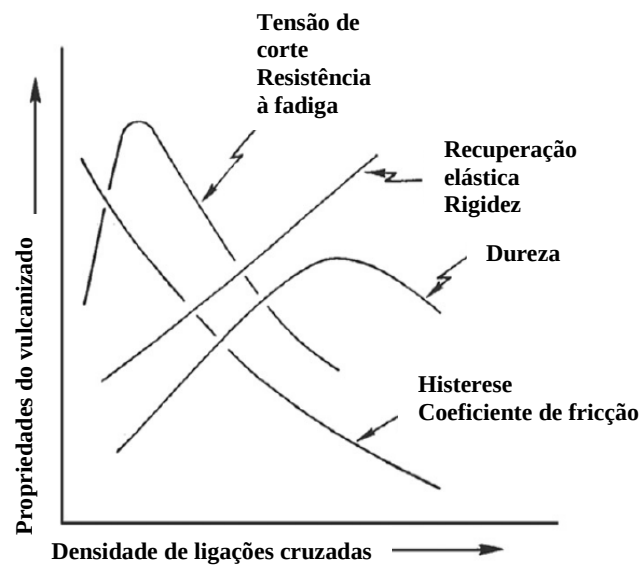


Figura 18- Variação das propriedades do composto com a qualidade da vulcanização (Coran 2013)

A análise do gráfico permite concluir que o aumento do número de ligações cruzadas, reduz a histerese, ou seja, diminui a energia gasta no processo. A tensão de corte, resistência à fadiga e dureza, aumentam com a formação de ligações, no entanto reduzem a partir de uma certa densidade de ligações. É de salientar que estas propriedades não são apenas função do número de ligações cruzadas, mas também do tipo de ligação, do tipo de polímero e do tipo e quantidade de reforço (Coran 2013).

Na Figura 19 é possível identificar uma prensa de vulcanização usada na Continental.

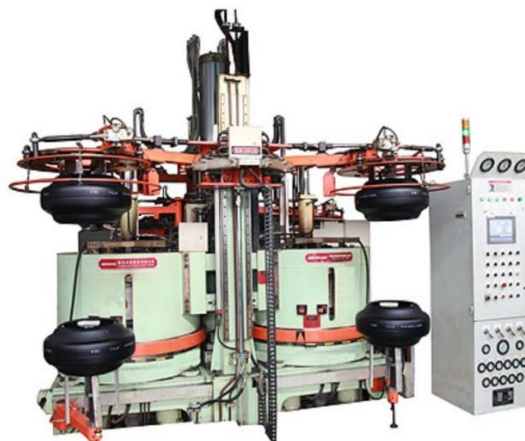


Figura 19- Prensa de vulcanização (Mesnac 2018)

O diafragma da prensa é colocado no interior do pneu e é insuflado por um fluido quente, pressionando o pneu verde contra o molde exterior, de modo a conferir o padrão do pneu e a aumentar a sua temperatura para se iniciar a vulcanização. Na Figura 20, é exemplificado um molde com os diferentes tipos de padrão, e o diafragma.

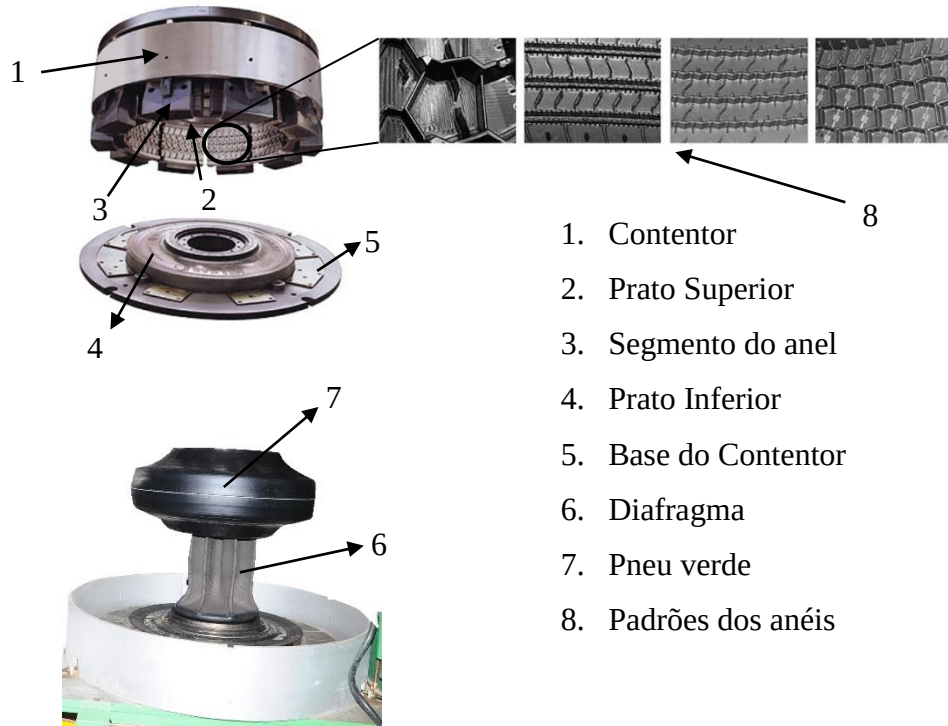


Figura 20- Molde de vulcanização de um pneu (adaptado de (Mesnac 2018))

Geralmente, o molde do pneu é dividido em 9 ou 11 partes e por efeito da pressão e da sua falta de estanquidade, gera-se rebarba em certas zonas do pneu, ou seja, o escape de borracha nas zonas de ligação dos anéis e do diafragma ao pneu. As principais causas da falta de estanquidade do molde são o seu desgaste devido ao uso e/ou à sua má preparação.

Para além desta rebarba, existe uma rebarba específica formada devido ao sistema de orifícios que têm como função libertar o ar presente dentro dos moldes, para este não ficar aprisionando e evitar imperfeições. Os *eurovents*, ao longo das várias vulcanizações, ficam bloqueados, permitindo o alojamento de borracha nos mesmos, e assim forma-se excesso de materiais com o formato dos orifícios.

Sintetizando, a Figura 21 mostra as zonas de aparecimento de rebarba. Pode-se observar que há 4 zonas particulares. Uma na zona do talão, onde existe a separação entre o pneu e o diafragma; a zona do ombro, onde há a separação entre os pratos; no piso, onde há a separação dos segmentos do piso; e nas zonas de saída de ar, onde os problemas dos orifícios se faz notar.

Esta rebarba não afeta o desempenho do pneu, no entanto torna-o com aspeto desagradável, sendo necessária uma ação extra de remoção (nem todas as empresas removem esta rebarba dos pneus). Esta ação extra não acrescenta nenhum valor ao produto final, e acarreta custos. Sendo assim, o objetivo é minimizá-los, sendo o que se pretende com esta dissertação: desenvolver e otimizar uma ferramenta de corte de rebarba na indústria de pneus.

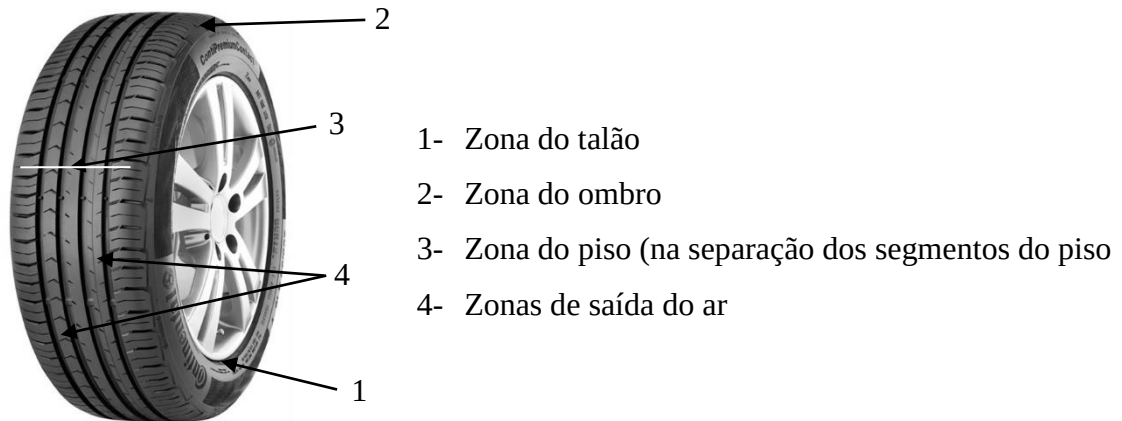


Figura 21- Zonas de formação de rebarba num pneu (adaptado de (AG 2013))

A Figura 22 mostra mais detalhadamente a rebarba nas zonas identificadas acima.



Figura 22- Exemplos de tipos de rebarba existentes: a) Zona do ombro; b) Zona do talão; c) Zona do piso; d) Zona de saídas de ar

2.2 Mecanismos de corte de rebarba

Na literatura, podem-se encontrar alguns métodos de acabamento ou remoção de excesso de material. De seguida, são descritos alguns desses métodos e a razão pela qual não são utilizados no corte de rebarba na indústria de pneus.

O aumento da complexidade da geometria das peças, obrigou a indústria a desenvolver tecnologias de produção mais versáteis e flexíveis. Assim, graças à descarga precisa e flexível de um raio laser, este método de remoção de excesso de material teve um crescimento importante. O impulso curto de um laser produz um elevado aumento de temperatura numa zona restrita, que cria uma reação termoquímica entre o meio eletrólito (ácido fosfórico) e os átomos da superfície e remove o material em excesso. Como se pode ver na Figura 23, este

método remove o material em excesso, sendo que a azul é a remoção de material nas zonas baixas de titânio rugoso, e a vermelho nas zonas altas. Verifica-se que a partir de certa altura a superfície está quase lisa porque as taxas de remoção em ambas as zonas são idênticas. A razão pela qual este método não é utilizado, é devido ao elevado aquecimento da superfície, o que num pneu, pode levar à sua inflamação, e assim destruí-lo (Eckert and Vollertsen 2018).

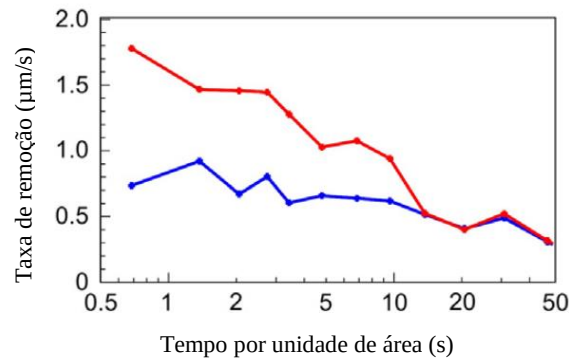


Figura 23- Taxa de remoção de material pelo método a laser (Eckert and Vollertsen 2018)

Pela dificuldade em se obter um acabamento, também foram desenvolvidos métodos para contornar o problema. Um dos métodos é o acabamento abrasivo rotacional que envolve a rotação do agitador e da peça em sentidos opostos e um meio abrasivo entre eles. É um método mais utilizado para o acabamento de interiores. A Figura 24 demonstra o método.

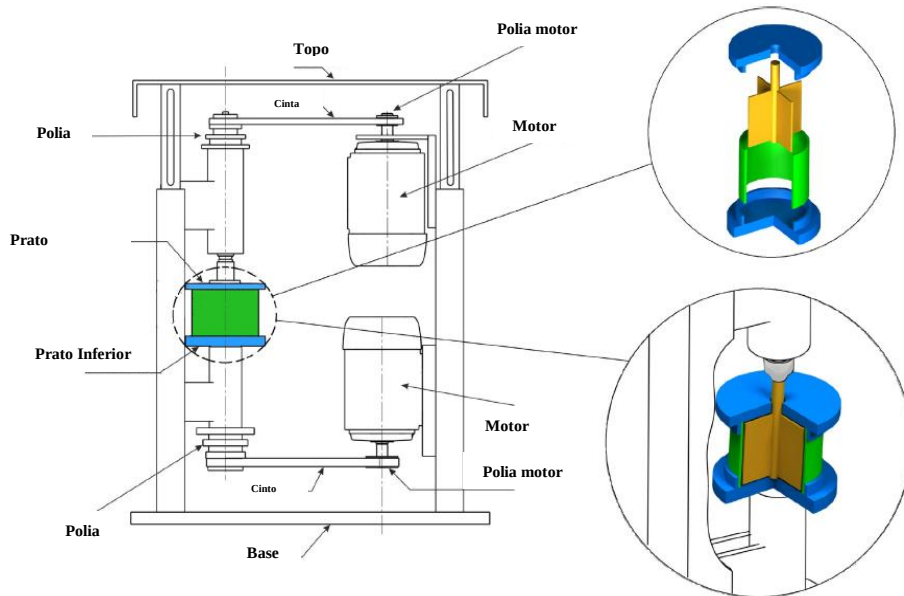


Figura 24- Método de acabamento rotacional (Azami, Azizi, and Khoshanjam 2018)

Vários fatores afetam este método, como o tamanho das partículas abrasivas, a distância das pás rotativas à peça e a velocidade de rotação. Após análise, concluiu-se que o número de partículas e o seu volume aumentam com a velocidade de rotação que aumenta a taxa de remoção; o aumento da distância das pás à peça diminuiu a força resultante de impacto das partículas à peça o que diminui a taxa de remoção de material; e o aumento da velocidade de rotação aumenta a taxa de remoção. Este método não é ideal para o corte de rebarba na indústria de pneus, pois esta surge também no exterior do pneu e este método é utilizado para acabamento de interiores (Azami, Azizi, and Khoshanjam 2018).

O acabamento por abrasão magnética é um método de acabamento ou remoção de excesso de material não tradicional. É utilizado para peças de alta qualidade superficial e o

produto final fica com melhor resistência à abrasão. O método é semelhante ao anterior, no entanto pode ser adaptado para outros tipos de superfícies que não interiores, e a diferença é que o meio abrasivo é magnético. Assim, as partículas magnéticas abrasivas removem o material em excesso da peça devido às forças magnéticas entre a peça e os ímanes. Não existe contacto entre as mesmas. As variações de taxa de remoção são iguais ao método anterior e dependem dos mesmos fatores. Acrescenta-se apenas o facto de o ângulo entre os ímanes ser ideal a 90° (Li et al. 2018). A Figura 25 exemplifica o método para a remoção de excesso de material no interior de um cilindro.

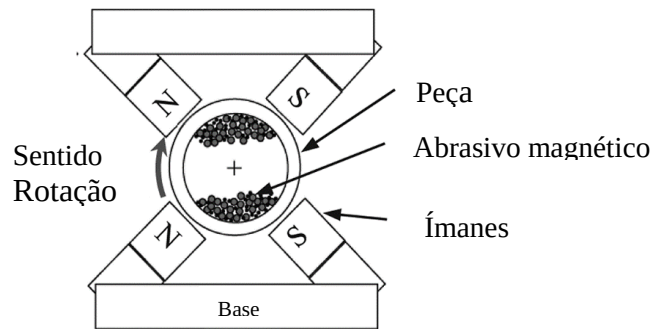


Figura 25- Método de acabamento magnético abrasivo (Li et al. 2018)

Este método é, no entanto, útil apenas para um determinado tipo de rebarba, tendo que se adaptar uma máquina para cada zona de aparecimento desta. Assim, este método torna-se inviável (Li et al. 2018).

Na indústria, está-se a desenvolver rapidamente o método de acabamento vibratório, devido ao seu fácil controlo e baixo custo. Neste método, a peça é colocada dentro de um recipiente ou de um tubo apoiado em diversas molas, com um meio abrasivo no interior e abanado, como se pode ver pela Figura 26.

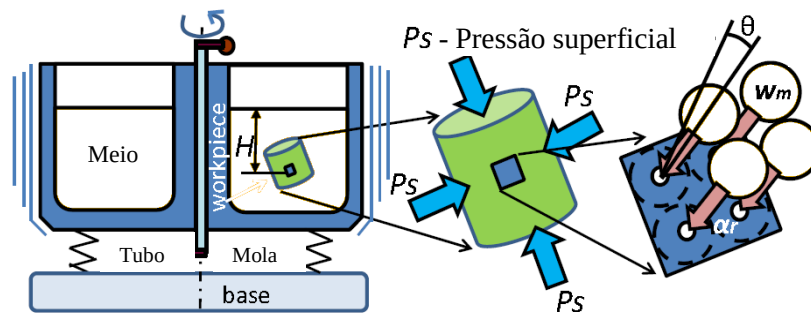


Figura 26- Método de acabamento vibratório (Hashimoto, Johnson, and Chaudhari 2016)

O tubo vibra por transmissão das forças pelas molas, as partículas abrasivas do meio chocam com a peça e assim esta é retificada. Salienta-se que a força de impacto das partículas é devida essencialmente à força hidrostática do meio. Este método não é viável para a indústria de pneus porque pode danificar de uma forma irreversível qualquer parte do pneu.

Apesar da procura de diferentes alternativas para o corte de rebarba, o método mais comum e atualmente utilizado é com recurso a ferramentas de corte para a rebarba. Essa ferramenta é em geral uma faca, como se podem ver exemplos na Figura 27 (Hashimoto, Johnson, and Chaudhari 2016).

Este método é utilizado há décadas, sendo necessário o seu desenvolvimento, inovação e procura por melhoria no processo de corte, desde a remoção de rebarba ao afiamento da faca. O maior problema é a sua durabilidade, que é fraca, devido à fraca resistência ao

desgaste do material que são produzidas. De modo a melhorar essa resistência é necessário perceber como funciona o fenómeno de desgaste.



Figura 27- Exemplos de ferramentas utilizadas no corte de rebarba

2.3 Desgaste

O fenómeno de desgaste é a remoção de material devido ao movimento relativo entre duas superfícies sólidas em contacto. É uma consequência das elevadas forças aplicadas e do atrito entre as superfícies. A remoção de material pode acontecer numa superfície ou em ambas.

Existem diversos tipos de desgaste, dependendo do tipo de movimento relativo entre as superfícies. Neste caso, os tipos de desgaste que interessam são os desgastes por ação mecânica, sendo que o desgaste devido à ação química está fora do panorama. Apresentam-se todos os tipos de desgaste na lista seguinte (Industries):

- Abrasão;
- Adesivo;
- Corrosivo;
- Deformação;
- Erosão;
- Fadiga;
- Impacto;
- Rolamento.

De todos estes tipos de desgaste, os mais usuais na indústria de corte são por abrasão e o adesivo (Industries 2018, Soares 1992).

Existem dois tipos de desgaste abrasivo como mostra a Figura 28. O desgaste abrasivo de dois corpos que ocorre quando uma superfície mais dura desliza sobre uma macia, e a força normal aplicada desgasta a última. O desgaste abrasivo de três corpos ocorre quando partículas entre dois corpos desbastam as superfícies. Este último tipo de desgaste abrasivo tem uma maior taxa de remoção de material (Sarkar 1976b).

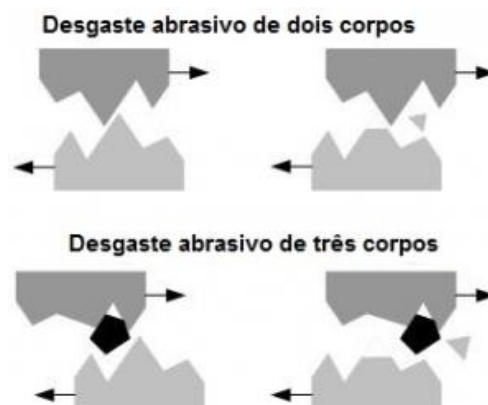


Figura 28- Tipos de desgaste por abrasão (Vicente 2016)

A Figura 29 mostra um contacto ideal entre superfícies e uma idealização de um desgaste abrasivo.

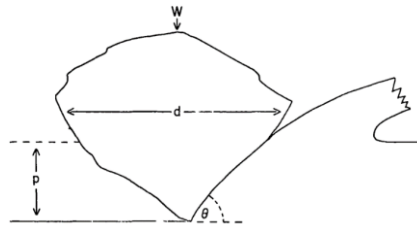


Figura 29- Idealização do desgaste abrasivo (Moore 1978)

O desgaste de uma superfície é inversamente proporcional à sua dureza e proporcional à força normal aplicada, ou seja, quanto mais duro for um material, menor será o desgaste e quanto mais carga for aplicada, maior será o desgaste. Vários fatores influenciam este tipo de desgaste, como o tamanho, a geometria, o tipo de meio abrasivo, a humidade e a temperatura.

Na Figura 30 é possível verificar que, a quantidade de partículas abrasivas influenciam o nível de desgaste. Trata-se de desgaste de um aço ferrítico-perlítico que contém diferentes percentagens de óxido de alumínio, sendo este óxido o causador de níveis de desgaste diferentes (Binder, Klocke, and Doeblener 2017).

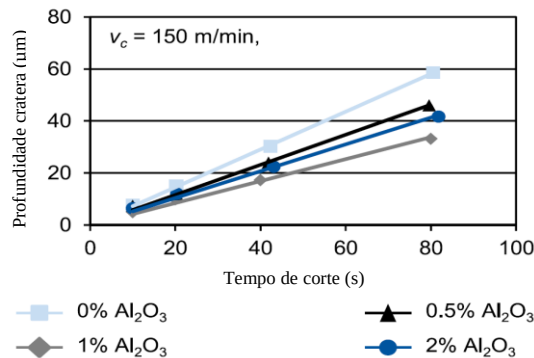


Figura 30- Variação da profundidade da cratera com a percentagem de partículas abrasivas (Binder, Klocke, and Doeblener 2017)

Verifica-se também a diferença na superfície através da Figura 31, onde o aço com óxido de alumínio possui zonas com crateras.

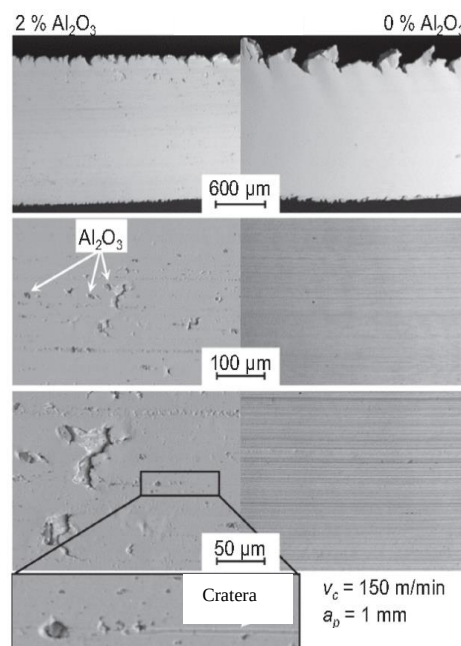


Figura 31- Imagens de amostras obtidas num microscópio eletrónico (SEM) de um aço ferrítico-perlítico após desgaste (Binder, Klocke, and Doeblener 2017)

O outro tipo de desgaste, o desgaste adesivo, ocorre também devido ao contacto entre duas superfícies, no entanto, dá-se a deformação plástica de uma das superfícies e o material é arrancado aderindo à superfície do outro. Este tipo de desgaste depende dos mesmos fatores que o anterior, e a Figura 32 mostra que o aumento da pressão de contato aumenta a taxa de material removido, tal como no caso anterior.

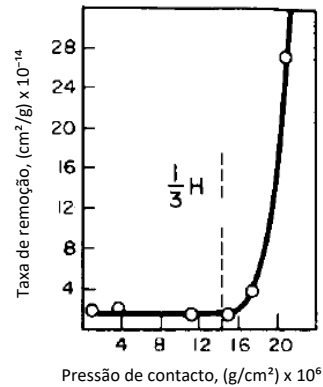


Figura 32- Variação da taxa de remoção de material com a pressão de contacto (Sarkar 1976a)

Existem algumas fases durante o processo de desgaste adesivo, e isso pode-se verificar pela variação do coeficiente de atrito ao longo do tempo numa amostra de carboneto de tungsténio que foi desgastada num meio de nitreto de zircónio, dada pela Figura 33. Pode -se verificar três fases. Uma fase inicial, onde o coeficiente é baixo devido ao arranque de material que rola entre as superfícies; uma fase de crescimento elevado do coeficiente que é quando se dá a adesão das partículas; e uma ligeira diminuição do coeficiente que posteriormente se mantém constante devido ao polimento das zonas da superfície em contacto (Valerini et al. 2013).

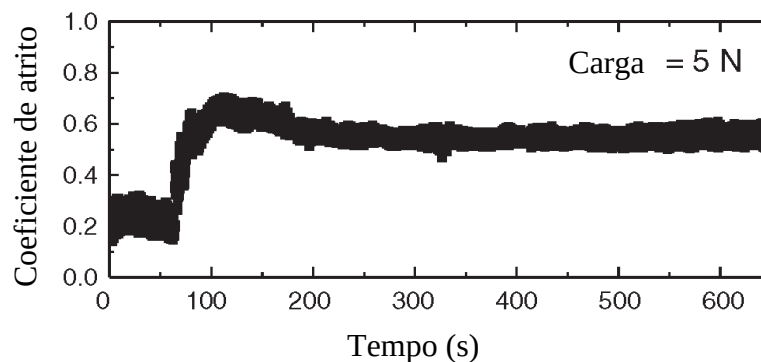


Figura 33- Coeficiente de atrito do carboneto de tungsténio em meio de nitreto de zircónio (Valerini et al. 2013)

Depois de analisados os tipos de desgaste mais usuais em ambiente industrial, é necessário encontrar os materiais mais adequados para utilizar na ferramenta de corte com elevada resistência ao desgaste.

2.4 Materiais para ferramentas de corte

Um material ideal para ser utilizado como ferramenta de corte, dentro dos valores monetários viáveis, são os aços. Na dissertação anterior (Correia 2018), como já foi referido, foram analisados aços de trabalho a frio (Vanadis 8, Sleipner e AISI D2), um aço inoxidável (440 C) e o aço de construção utilizado na ferramenta atual (C45E: norma europeia), através da sua composição química, microestrutura, dureza e tratamentos térmicos.

Nessa análise, concluiu-se que há fatores que influenciam o desempenho da ferramenta de corte, e é necessário analisá-los de modo a entender de que forma se obtém a melhor escolha para uma ferramenta de corte. Na Tabela 2 encontram-se as composições químicas e durezas dos aços analisados na dissertação anterior.

Tabela 2- Composição química e dureza dos aços analisados na dissertação anterior (Correia 2018)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S	Dureza (HRC)
Vanadis 8	2.3	0.4	0.4	4.8	3.6	8.0	-	-	63
Sleipner	0.8-1	0.7-1.1	0.25-0.6	7-8.5	2.3-2.8	0.4-0.6	-	-	60
C45E	0.42-0.5	0.4	0.5-0.8	-	-	-	0.035	0.035	60
440 C	0.95-1.20	1	1	16-18	0.75	-	0.04	0.03	53
AISI D2	1.45-1.6	0.1-0.6	0.2-0.6	11-13	0.7-1	0.7-1	0.03	0.03	64

No aço 440 C foram detetados, na sua microestrutura, carbonetos finos numa matriz martensítica revenida, o aço D2 era composto essencialmente por carbonetos irregulares e distribuídos de forma aleatória numa matriz martensítica após têmpera e revenido. No aço Sleipner encontravam-se carbonetos de cromo, molibdénio e vanádio numa matriz martensítica, que após têmpera e revenido se transforma numa matriz martensítica com carbonetos grosseiros e finos. No aço Vanadis 8 também se verificou a transformação martensítica e a presença de carbonetos muito finos e uniformemente distribuídos.

Os aços com melhores resultados no teste de desgaste por esfera rotativa foram o Sleipner e AISI D2, os que têm carbonetos com uma morfologia mais grosseria. O aço utilizado atualmente (C45E) foi o que obteve maior desgaste (Correia 2018).

Com esta análise fica perceptível os fatores que influenciam o desempenho da ferramenta de corte, como será explicado posteriormente.

2.4.1 Fatores que influenciam o desempenho da ferramenta de corte

Um dos fatores que influenciam o desempenho da ferramenta de corte são os elementos de liga. Pretende-se que estes elementos presentes no aço proporcionem as propriedades anteriormente referidas. É necessário evitar o aparecimento de fósforo que torna o aço quebradiço à temperatura ambiente. Os elementos que melhoram as propriedades de corte são o manganês, o cromo, o molibdénio, o tungsténio e o vanádio.

O tungsténio exerce uma ação semelhante ao vanádio. É um forte formador de carbonetos, muito duros. Melhora a tenacidade e o tempo de duração de corte. Opõe-se ao aumento do tamanho de grão (Soares 1992).

Na Tabela 3 verificam-se valores de dureza de alguns carbonetos.

Tabela 3- Dureza de carbonetos (García et al. 2019)

Carboneto	Dureza (HV)
WC	2345
Mo ₂ C	1773
TiC	2753
VC	2800
Cr ₇ C ₃	2100
NbC	1835
TaC	1631

Outro fator que influencia as propriedades do aço é o tamanho de grão. O aumento do tamanho de grão é indesejável. Quanto menor for o tamanho de grão, maior será a resistência e a tenacidade (Figura 34).

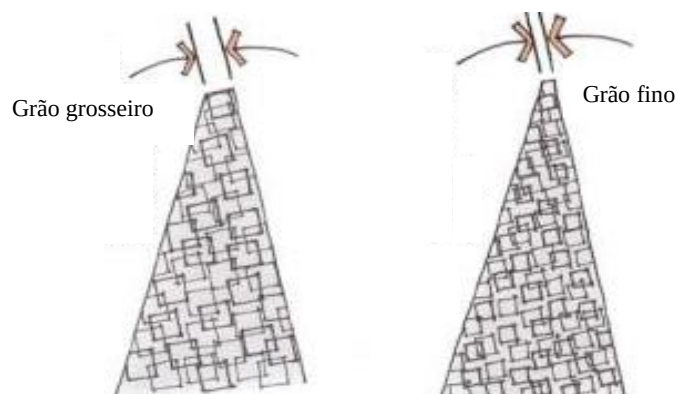


Figura 34- Ferramentas de corte constituídas por diferentes tamanhos de grão (Hock 2010)

A temperaturas elevadas os átomos que formam os grãos estão num estado de grande excitação. Dada a ausência de inclusões entre grãos, os grãos adjacentes interpenetram-se, resultando uma unificação dos grãos. Os grãos aumentam assim de tamanho. Assim, a presença de partículas entre os grãos, como carbonetos, dificulta o crescimento de grão, quando estes não se dissolvem (Soares 1992). Um estudo feito num aço austenítico com alto teor de manganês (25% da massa), com tamanhos de grão diferentes demonstra esta influência, como se verifica na Tabela 4.

Tabela 4- Propriedades mecânicas de um aço austenítico com diferentes tamanhos de grão (Yuan et al. 2014)

Tamanho de grão	Tensão limite de elasticidade	Tensão de rotura	Extensão após rotura
(μm)	(MPa)	(MPa)	(%)
2.2	410.0	725.0	15.4
5.4	313.3	629.3	44.3
9.8	263.3	568.3	46.5
28.7	232.5	517.0	54.2

À medida que o tamanho de grão aumenta, a tensão limite de elasticidade diminui, a tensão de rotura também, o alongamento aumenta e a dureza diminui. A Figura 35 mostra a variação da dureza.

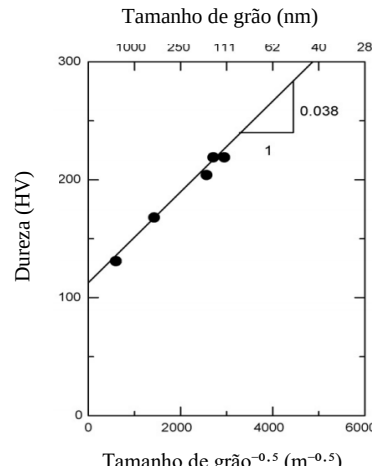


Figura 35- Propriedades mecânicas de um aço austenítico com diferentes tamanhos de grão (Yuan et al. 2014)

2.4.2 Revestimentos

Para além dos tratamentos térmicos comuns, existem outros tipos de procedimentos de modo a conferir aos aços as propriedades desejadas. Estes tratamentos têm como fim melhorar a dureza e a resistência ao desgaste superficial do aço.

O revestimento por deposição física de vapor (PVD) e por deposição química de vapor (CVD) fazem parte desses procedimentos. A camada dura dos aços tratados desta maneira é normalmente constituída por nitretos de titânio, carbonetos de titânio e carbonetos de tungstênio. Estes revestimentos podem apresentar durezas de 3000 HV, baixo coeficiente de atrito e elevada resistência ao desgaste (Soares 1992).

O processo PVD é caracterizado pelo revestimento passar da fase condensada para vapor e depois novamente condensada num fino filme. Os métodos mais comuns são o *sputtering* e a evaporação. O método de *sputtering* trata-se de um bombardeamento de partículas no aço a revestir a alta energia, que resulta na sua ionização e deposição. O método de evaporação trata-se de aquecer as partículas até se evaporarem e depois depositar sobre o aço a revestir (Coatings 2010).

O processo CVD ocorre na mesma situação, no entanto o material depositado é obtido através de uma reação química que decompõe um gás.

A Figura 36 mostra as diferenças de dureza dos diferentes materiais de revestimento.

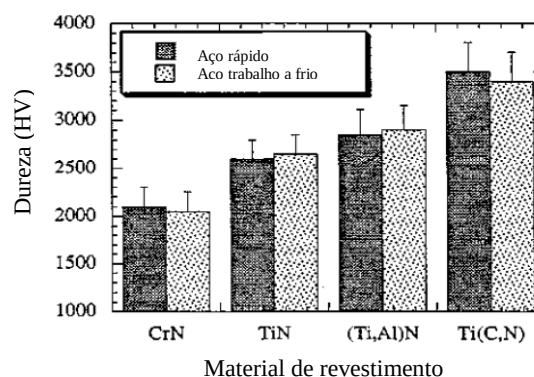


Figura 36- Durezas pós tratamento PVD (Paskvale 2007)

Estas grandezas de dureza podem ser obtidas através da deposição do material de revestimento de várias maneiras: por monocamada, onde só uma camada é depositada; por multicamada, onde são depositados dois ou mais materiais; ou por *superlattice*, onde o revestimento é composto por várias camadas na ordem dos nanómetros (Mattox 2010).

Com esta análise e recorrendo à dissertação anterior, não se encontra algo que resolva devidamente o problema de rebarba no pneu, algo que tenha um elevado desempenho (bom corte, com elevada duração entre afiamentos). Por isso, estudou-se a hipótese de utilizar uma faca em carboneto de tungsténio.

2.5 Carboneto de Tungsténio

O carboneto de tungsténio é o material mais usado na construção de ferramentas de corte para as mais diversas aplicações, pois a resistência ao desgaste e poder de corte são bastante elevados. No entanto, a escolha e seleção do tipo correto, torna-se crucial e depende de vários fatores, como o tamanho de grão e a percentagem de cobalto (Materials 2009). Deste modo, é feita uma abordagem ao processo de fabrico do carboneto de tungsténio, as suas propriedades e características.

Em 1781, Carl Wilhem Scheele descobriu o tungsténio, iniciando a aplicação de carbonetos sinterizados na indústria. O primeiro carboneto de tungsténio sinterizado ocorreu em 1890 pelo químico francês Henri Moissan, e no início da década de 20 do século XIX começou-se a sua produção para o processo de fabrico de lâmpadas (Association 2005, Davis et al. 1989)

Este tipo de material é formado por um carboneto duro e por elemento aglomerante. O carboneto duro, de elevada resistência ao desgaste é geralmente o carboneto de tungsténio (WC), que se pode apresentar associado a outros carbonetos como o de titânio (TiC), de Vanádio (V_4C_3) de Nióbio (NbC) e de Tântalo (TaC). O elemento aglomerante é normalmente o cobalto, cuja função é ligar os carbonetos, e é responsável pela tenacidade do material (Davim 2008). A elevada solubilidade do carboneto de tungsténio no cobalto a elevadas temperaturas e a boa molhabilidade do WC pelo cobalto resulta numa excelente densificação durante a fase líquida da sinterização, permitindo obter uma estrutura “livre” de poros. Como resultado, é alcançado um material que combina resistência, tenacidade e dureza elevadas (Figura 37) (Davis et al. 1989).

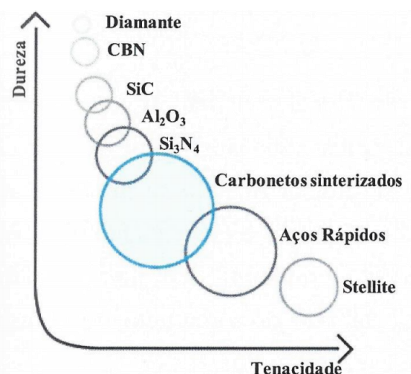


Figura 37- Dureza vs Tenacidade entre carbonetos sinterizados e outros materiais (Materials 2009)

Verifica-se, assim, que se conseguem obter durezas mais elevadas com os carbonetos de tungsténio do que com os aços, e consequentemente melhor resistência ao desgaste. Tendo em conta este facto, e o trabalho anterior realizado (Correia 2018), em que se utilizaram vários tipos de aços. Pretende-se agora verificar o comportamento de uma ferramenta de CW

e comparar com os resultados obtidos anteriormente, de modo a conceber a melhor ferramenta para o corte de rebarba de pneu.

2.5.1 Produção

Os carbonetos sinterizados são produzidos pelo processo de pulverometalurgia. Este processo pode ser definido como um conjunto de técnicas e processo para a produção de pós de materiais metálicos, e do seu processamento em produtos metalúrgicos consolidados numa massa de pós coerente, através da aplicação de elevadas pressões e calor (Ferreira 2002). Neste processo, as operações seguem uma sequência como ilustra a Figura 38.

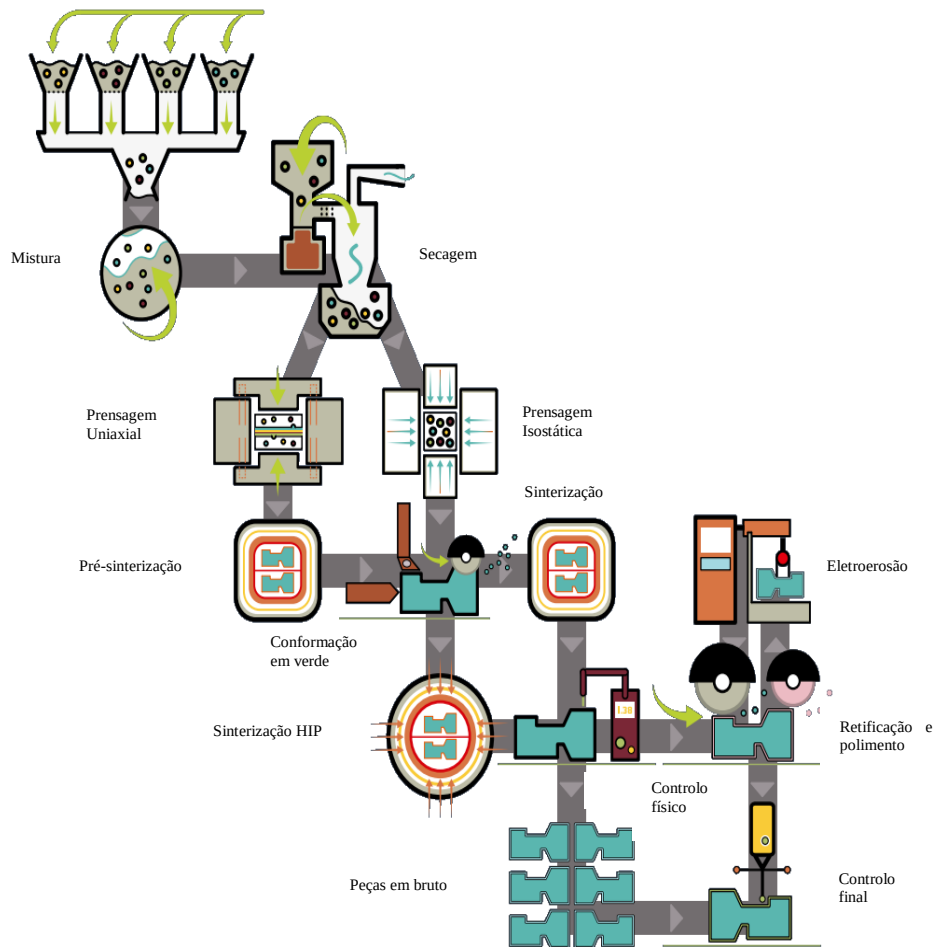


Figura 38- Esquema do processo comum de produção de WC (Durit 2017)

Resumidamente, o processo divide-se em:

- Produção e processamento dos pós;
- Compactação;
- Pré sinterização e pré formação do WC;
- Sinterização dos pós de WC;
- Tratamento pós sinterização.

2.5.1.1 Produção e processamento de pós de WC

Dos 39 minerais de tungstênio existentes, apenas a *sheelite* (tungstato de cálcio - CaWO_4) e a volframite (tungstato de ferro-manganês - FeWO_4 , MnWO_4) têm interesse comercial, sendo a partir dos quais se obtém o tungstênio (Sandvik 1994).

O método de utilizado para a sua obtenção é o de redução de óxidos, que se baseia no equilíbrio das reações de redução, numa atmosfera rica em hidrogênio, as quais possibilitam a obtenção de pó com uma estrutura irregular esponjosa (Ferreira 2002). O minério é então processado quimicamente, resultando nos óxidos de tungstênio e paratungstato de amônia, que são reduzidos e obtém-se tungstênio puro.

Variando as condições sob as quais ocorre a redução, é possível obter pós com diferentes tamanhos de grão. Se a redução ocorrer a baixas temperaturas, com pequenas quantidades de óxido de tungstênio e com excesso de hidrogênio, obtém-se pós de tungstênio finos. Caso contrário, obtém-se grãos mais grosseiros. A adição de pequenas quantidades de vanádio, crômio ou tântalo aos pós de tungstênio e ao carbono antes da carburização, permitem a obtenção de grãos extra finos ($<1 \mu\text{m}$) (Sandvik 1994, Eisen 1998).

O passo seguinte é a produção do carboneto de tungstênio. Antes da carburização é misturado o tungstênio e o carbono, sendo o método a utilizar importante para o tamanho de grão. De seguida a mistura é aquecida em fornos de indução, numa atmosfera protetora de hidrogênio até 1770°C . Dá-se a carburização que permite obter o carboneto de tungstênio (WC) (Ferreira 2002, Sandvik 1994)

Outros carbonetos, de tungstênio - titânio, tântalo, nióbio - são aplicados em ferramentas de corte com o objetivo de resistir ao desgaste químico, sendo produzidos a partir dos respetivos óxidos. Estes óxidos são combinados com o pó de tungstênio e carbono, a mistura é aquecida numa atmosfera de vácuo ou hidrogênio para reduzir os óxidos e formar os carbonetos (Davis et al. 1989).

2.5.1.2 Compactação

Para formar o aglomerado, é adicionado o aglomerante cobalto. Esta mistura passa por uma série de moinhos rotativos ou vibratórios para ser uniformizada e homogeneizada. A uniformidade das partículas de cobalto tem influência nas propriedades mecânicas do produto sinterizado. O passo seguinte é a prensagem do carboneto em verde, a elevadas pressões e temperaturas. Normalmente é utilizada a prensagem uniaxial a frio (Eisen 1998, Ferreira 2002).

A compressão é efetuada por acionamento de translação vertical de punções a valores ajustados de pressão. A operação fica concluída com a ejeção do compacto verde (Figura 39) (Ferreira 2002).

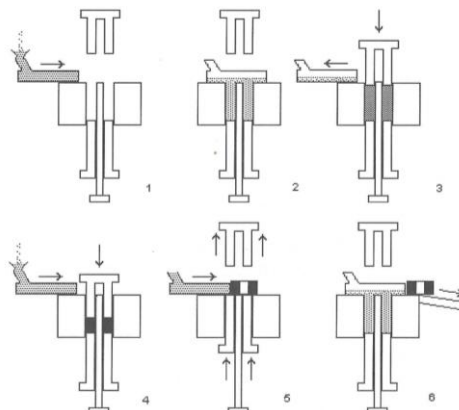


Figura 39- Esquema de compactação de pós numa prensa uniaxial (Ferreira 2002)

Um método alternativo é efetuar a prensagem a frio de forma isostática, onde os pós estão sujeitos a pressões em todas as direções. Consiste na aplicação de pressão hidrostática, através de um fluido, a um molde de borracha, de forma a densificar até 60% a 80% da densidade teórica. Este processo permite peças mais homogêneas, no entanto a taxa de produção é baixa (Ferreira 2002, Eisen 1998).

2.5.1.3 Pré sinterização e pré formação do WC

Trata-se de um tratamento térmico realizado a baixa temperatura, em hidrogénio ou vácuo, para remover o lubrificante que foi usado durante a prensagem. Assim, é possível conceder ao compacto uma rigidez suficiente para que se possa pré formar. As peças têm de ser dimensionadas com tolerância de modo a corresponderem às dimensões desejadas a obter após o processo de sinterização.

2.5.1.4 Sinterização

Provavelmente é a etapa mais importante do processo. É uma etapa complexa que decorre a elevadas temperaturas, onde há consolidação e o aumento da resistência das partículas do pó através da formação de conjuntos densos e coerentes, eliminando os poros. As temperaturas são abaixo do ponto de fusão dos constituintes.

Fundamentalmente, a sinterização consiste na remoção do lubrificante, na densificação e no desenvolvimento microestrutural do composto. É usual combinar estas operações num único ciclo de aquecimento de modo a diminuir os custos associados (Upadhyaya 1998).

O primeiro passo é a remoção do lubrificante. O compacto é aquecido até cerca de 500°C sob uma atmosfera de hidrogénio ou vácuo, tal como na pré sinterização. Após a remoção do lubrificante, os compactos são aquecidos entre os 1350°C e os 1600°C, dependendo da quantidade de cobalto (baixa temperatura para carbonetos com cerca de 30% de cobalto e temperatura elevada para carbonetos com <3% de cobalto) (Eisen 1998, Ferreira 2002).

Usualmente são utilizados dois métodos para sinterizar: ou sob hidrogénio ou sob vácuo. Para aplicações especiais recorre-se à *Sinter-HIP* ou à pressão isostática a quente (*HIP – Hot Isostatic Pressure*).

Sinterização sob hidrogénio

Como o nome indica, trata-se de uma sinterização sob uma atmosfera de hidrogénio. Isto promove um ambiente redutor que facilita a correta carburização e oxidação. A possibilidade de controlar a atmosfera de hidrogénio torna-se adequada para os carbonetos sinterizados básicos, mas devido ao seu potencial de oxidação ser normalmente elevado, não se torna possível sinterizar compostos contendo TiC, TaC e/ou NbC. O oxigénio presente é reduzido a vapor de água e é eliminado do processo sem afetar a composição de carbono. Para se obterem menores quantidades de oxigénio, estes compostos são sinterizados a vácuo (Eisen 1998)

Sinterização sob vácuo

Este é o método mais utilizado devido às vantagens que apresenta em relação ao método anterior, permitindo um maior controlo na composição dos produtos. A baixas pressões, a taxa de remoção do carbono e do oxigénio com a atmosfera é extremamente baixa. Assim, este método torna-se adequado para a sinterização de compostos com TiC, TaC e/ou NbC, que são muito sensíveis à oxidação.

O ciclo térmico é constituído por um aquecimento lento e controlado, com estabilização a uma temperatura intermédia para garantir a qualidade de ligação da adição de TiC, TaC e/ou NbC. À temperatura de sinterização dá-se a eliminação praticamente total dos poros e é atingida a densidade máxima do componente (Eisen 1998).

Sinter-HIP

A *Sinter-HIP*, sinterização sob pressão isostática a quente, é um processo realizado num forno a quente contido num recipiente de pressão intermédia. Neste método, os pós são submetidos, sob uma atmosfera de argon, a uma pressão que pode variar entre os 1,5 MPa e os 10 MPa, à temperatura de sinterização, de modo a reduzir, ou mesmo eliminar a porosidade existente, pela aplicação de pressão isostática. A remoção do lubrificante, a redução de oxidação e sinterização, seguidos de aplicação de baixas pressões isostáticas a quente, perfazem um ciclo completo de sinterização segundo este método. O custo associado é superior a qualquer outro método (Eisen 1998).

Prensagem isostática a quente – HIP

Trata-se de um método de pós sinterização, realizada num ambiente de alta pressão, onde se dá a compactação dos pós de carboneto de tungsténio em moldes de grafite. À semelhança do *sinter-HIP*, utiliza uma atmosfera de argon, com pressões a rondar os 100 MPa. Faz com que a porosidade seja reduzida ao mínimo, podendo ser utilizado nos pós pré sinterizados. Os custos são acrescidos, no entanto, o acabamento é melhor, obtendo-se carbonetos com tamanho de grão fino, com pequenas quantidades de cobalto e de carbonetos cúbicos (Eisen 1998).

2.5.1.5 Tratamento pós sinterização

O tratamento pós sinterização consiste na maquinagem da peça final (retificação ou polimento), recorrendo a ferramentas à base de diamante ou carboneto de silício de modo a atingirem a forma, acabamento superficial e tolerâncias geométricas necessárias (Eisen 1998).

Para além da maquinagem, podem ser feitos revestimentos às peças, sendo os revestimentos em PVD e CVD os mais comuns. Estes processos foram explicados no capítulo 2.4.4 e os materiais mais utilizados são indicados na Figura 40.

» PVD						
REVESTIMENTO	COR	DUREZA HV 0,05	TEMPERATURA DE SERVIÇO MÁX. °C	COEFICIENTE DE ATRITO	RESISTÊNCIA AO DESGASTE	CARACTERÍSTICAS
HardTiN®	dourado	2600	650	0.7	+	resistência à corrosão
HardTiL®	cinzento escuro	3300	850	0.5 - 0.7	++	resistência à corrosão, boa tenacidade
HardCrom®	plateado	2700	900	0.3 - 0.4	+	muito boa resistência à corrosão
HardTiC®	cinza	2700	450	0.2 - 0.3	+	baixo coeficiente de atrito
DiExtra®	preto	2700/1200	400	0.3	+	baixa adesão
DiaPlus®	cinzento escuro	3300/1400	550	0.3	++	excelentes propriedades térmicas
Galaxy®	cinzento escuro	3600	1100	0.5 - 0.7	++	resistência à temperatura
MoldLub®	cinzento metalizado	2000	900	0.2	+	baixa adesão
HardSilik®	cinzento metalizado	2600	1100	0.6	+	resistência à temperatura
HardTribo®	cinzento metalizado	3000 - 4000	900	0.4	+++	baixo atrito
UltraImpact®	cinzento	2500 - 3000	1000 - 1100	0.5	++	estabilidade
DuraLub®	branco	2800 - 3000	600	0.3 - 0.4	++	excelentes propriedades térmicas
D-Mold®	castanho metalizado	2000 - 2500	850	0.3	++	baixa adesão
HardCut®	preto	4000	900	0.2	++++	estabilidade
» CVD						
TiC/TiN	dourado	2700	500	0.6	++	alta tenacidade
Diamond	cinzento escuro	10000	700	0.2	+++++	baixo coeficiente de atrito

Figura 40- Revestimentos para WC (Durit 2017)

2.5.2 Propriedades mecânicas

Após o conhecimento da constituição e produção dos carbonetos de tungstênio é necessário analisar a sua influência nas propriedades mecânicas. Normalmente, estes carbonetos têm uma excelente resistência à abrasão, ao desgaste e elevada dureza. O que influencia estes parâmetros são a quantidade de cobalto e o tamanho de grão (Upadhyaya 1998).

O tamanho de grão pode ser classificado da seguinte forma (Figura 41):

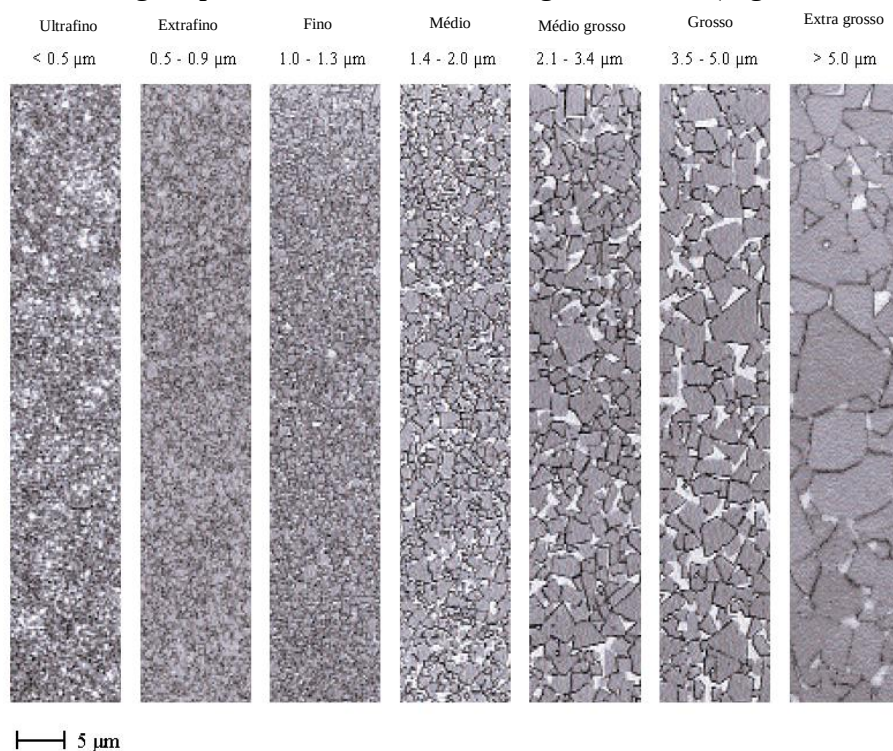


Figura 41- Classificação do tamanho de grão (Sandvik 2012)

2.5.2.1 Dureza

Como já foi referido, a dureza é afetada principalmente pelo tamanho de grão e pela quantidade de cobalto, que é determinante na resistência à abrasão, ao desgaste e poder de corte. Na Figura 42 é possível verificar a influência destes dois parâmetros na dureza. Conclui-se que para tamanhos de grão mais pequenos e para quantidades baixas de cobalto, que a dureza tende a aumentar, variando entre os 1100 HV e 2000 HV (Ferreira 2002, Eisen 1998)

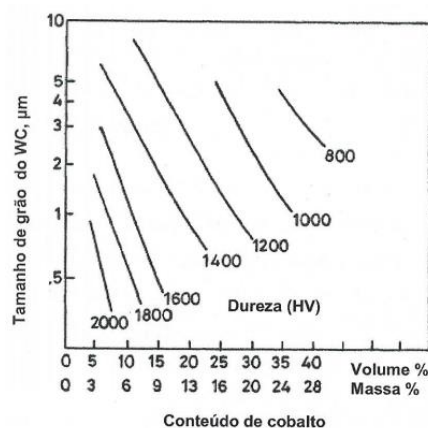


Figura 42- Dureza em função do tamanho de grão e conteúdo de cobalto (Upadhyaya 1998)

2.5.2.2 Tensão de rutura transversal

A tensão de rutura transversal (TRT) é uma importante propriedade mecânica que combina tensão de corte, tensão de compressão e tensão de rutura e é usada como medida de tenacidade nos carbonetos sinterizados. Devido à sua elevada dureza, o carboneto de tungsténio não tem um bom comportamento quando submetido a um ensaio de tração uniaxial, sendo preterido pelo ensaio de flexão em três pontos.

Nos carbonetos cementados, a tensão de rutura é geralmente a tensão aplicada para originar a fratura num ponto de concentração de tensões ou na superfície tensionada da amostra. A tensão de rutura tende a aumentar com o aumento da quantidade de cobalto, contudo, a tensão máxima depende essencialmente do tamanho de grão. A Figura 43 ilustra o comportamento mecânico do carboneto variando estes parâmetros (Brookes 1996, Upadhyaya 2001).

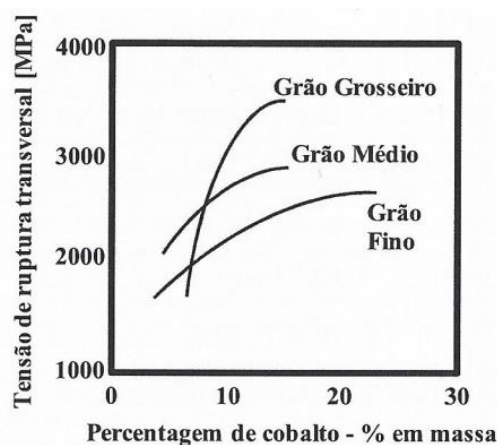


Figura 43- Tensão de rutura transversal em função da % de Co para três tamanhos de grão (Eisen 1998)

A adição de outros componentes como o TiC ao WC-Co demonstra um efeito adverso na tensão de rutura transversal, mas a adição de TaC tende a favorecer. O efeito da inclusão do NbC (carboneto de nióbio) tem um comportamento parecido com o anterior.

Concluindo, em relação a estas duas propriedades mecânicas é necessário ter um ponto de equilíbrio entre as duas, porque a alteração dos parâmetros que as influenciam têm um valor oposto em ambas, como se verifica pela Figura 44.

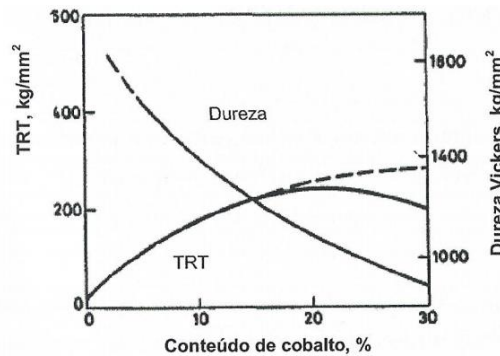


Figura 44- Efeito do cobalto na dureza e na TRT (Eisen 1998)

2.5.2.3 Tenacidade

A tenacidade é uma medida de resistência à propagação de fendas. Como os carbonetos têm durezas elevadas, é favorável o desenvolvimento de fratura frágil. O desgaste deste material é tipicamente por fratura em pontos localizados.

A tenacidade é também controlada pelos dois parâmetros anteriores, o tamanho de grão e a quantidade de cobalto. A Figura 45 mostra a variação da tenacidade com o cobalto para três tamanhos de grão (Upadhyaya 1998, Eisen 1998).

Retira-se que quanto maior for o compromisso entre o tamanho de grão e a quantidade de cobalto, maior será a tenacidade à fratura.

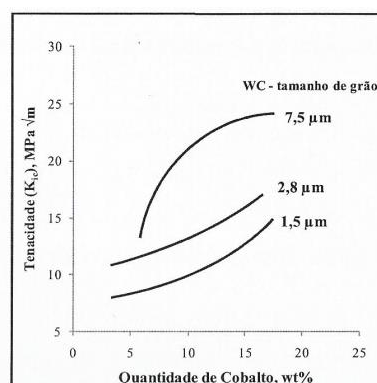


Figura 45- Tenacidade em função do tamanho de grão e da quantidade de cobalto (Eisen 1998)

Resumindo, a quantidade de cobalto e o tamanho de grão influenciam as propriedades mecânicas de diferentes formas. A adição de elementos de liga também provoca alterações nas propriedades mecânicas. Para uma ferramenta de corte com bom desempenho é necessário encontrar um equilíbrio entre estes parâmetros para se obter uma ferramenta com elevada dureza, mas suficientemente tenaz. As tabelas 5 e 6 mostram a influência de cada um destes parâmetros e dos elementos num carboneto de tungstênio.

Tabela 5- Efeito do tamanho de grão e quantidade de cobalto nas propriedades mecânicas (Ferraresi 1986)

Composição		Efeito sobre			
Componente	Quantidade relativa	Resistência ao desgaste	Dureza a quente	Resistência ao desgaste de cratera	Resistência mecânica
TaC	Pequena	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente
	Grande	Diminui ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Diminui ligeiramente
TiC	Pequena	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Diminui ligeiramente
	Grande	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Aumenta ligeiramente	Diminui ligeiramente

Tabela 6- Efeito dos elementos nas propriedades mecânicas (Ferraresi 1986)

O aumento de:	Leva a:				
	% Cobalto	Resistência à abrasão	Tamanho de grão	Dureza	Tenacidade
% Cobalto		Diminui		Diminui	Aumenta
Resistência à abrasão	Diminui		Diminui	Aumenta	Diminui
Tamanho de grão		Diminui		Diminui	
Dureza	Diminui	Aumenta	Diminui		Diminui
Tenacidade	Aumenta	Diminui	Aumenta	Diminui	

2.5.3 Classificação

A norma ISO (*International Organization for Standardization*) classifica os carbonetos pelos respectivos componentes e pela aplicabilidade de utilização, permitindo fazer a escolha adequada do material a usar na ferramenta. Podem ser K (ferros fundidos), P (aços), M (aço inoxidável), e mais recentemente foram feitas novas classificações como N (alumínios), S (superligas) e H (aços tratados). O número associado indica o tamanho de grão. A tabela 7 mostra a composição química e propriedades físicas de alguns carbonetos de tungstênio devidamente classificados (Davim 2008).

Tabela 7- Composições químicas e propriedades físicas segundo a norma ISO (Davim 2008)

Designação	Composição química aproximada (%)			Características físicas (mecânicas)				
	WC	TiC+TaC	Co	Massa vol. (g/m³)	Dureza Vickers (HV)	Tensão de rutura transversal (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Coef. Dilatação térmica (10 ⁻⁶ /K)
P01	30	64	6	7.2	1500	750	-	-
P10	55	36	9	10.4	1600	1400	5.2	6.5
P50	70	14	16	12.9	1300	2000	5.2	5.5
M10	84	10	6	13.1	1650	1400	5.8	5.5
M20	82	10	8	13.4	1550	1600	5.6	5.5
M40	78	7	15	13.5	1300	2000	5.5	5.5
K05	92	2	6	14.6	1700	1350	6.3	5.0
K10	92	2	6	14.8	1650	1500	6.3	5.0
K20	91.5	2.5	6	14.8	1550	1700	6.2	5.0
K30	89	2	9	14.5	1450	1900	-	5.5

A tabela 8 mostra a classificação dos carbonetos de tungsténio consoante a sua aplicabilidade. Mostram-se as três principais classificações, sendo que para além destas, os carbonetos de tungsténio também se dividem em tipo S, H e N. A partir desta tabela conclui-se que o carboneto de tungsténio mais adequado é do tipo K10 ou K20, pois pretende-se cortar a rebarba de um pneu, um material não ferroso, composto maioritariamente por composto de borracha.

Tabela 8- Aplicabilidade dos carbonetos sinterizados segundo a norma ISO (Davim 2008, Trent and Wright 2000)

Designação		Material a ser maquinado	Campos de aplicação
P	Azul	Materiais ferrosos de apara longa (aços e ferro fundido maleável)	
		P01 Aço, aço vazado	Operações de acabamento fino, avanço reduzido e elevada velocidade de corte (torneamento e furação de precisão). Exige máquinas rígidas e isentas de vibrações
		P10 Aço, aço vazado, ferro fundido maleável	Idem – para aplicações em que ocorre um elevado aquecimento da ferramenta de corte
		P20 Aço, aço vazado	Operações de desbaste ligeiro, com velocidades de corte médias a elevadas e avanço médio
		P25	Operações de desbaste com velocidades de corte e avanços médios
		P30 Aço, aço vazado, ferro fundido maleável	Operações com baixas e médias velocidades de corte e secções de apara médias a elevadas (torneamento, fresagem, aplainamento)
		P40 Aço, aço vazado com inclusões de areia e cavidades	Operações de desbaste pesado e em condições severas de corte, (corte interrompido) em máquinas sujeitas a vibrações. Velocidades baixas a médias e elevados avanços e profundidades de corte (torneamento e aplainamento)
		P50 Aço, aço vazado com baixa ou média resistência à tração, com inclusões de areia e cavidades	Idem – elevada tenacidade, aplicações em que se utilizam máquina obsoletas, onde substitui o aço rápido com vantagem
M	Amarelo	Classes universais (aços inoxidáveis, ferro fundido, ferro fundido nodular e maleável)	
		M10 Aço, aço vazado, ferro fundido cinzento ou ligado	Operações de torneamento com velocidades de corte médias a elevadas e secções de corte médias
		M20 Aço, aço vazado austenítico, ferro fundido cinzento	Operações de torneamento, fresagem e aplainamento, com velocidades de corte médias e secções de apara médias
		M30 Aço, aço vazado austenítico, ferro fundido cinzento, ligas resistentes a altas temperaturas	Idem- com secções de apara médias a elevadas
		M40 Aço temperado, ligas leves	Torneamento, sobretudo em máquinas automáticas
K	Vermelho	Materiais de apara curta (ferro fundido, aço temperado, não-ferrosos, plásticos, madeiras)	
		K01 Ferro fundido de alta dureza, aço temperado, plásticos muito abrasivos, cerâmicas	Operações de acabamento fino e de precisão, com corte ligeiro, avanço reduzido e velocidades de corte elevadas
		K04	Operações de acabamento, em torneamento e furação de precisão, com elevada velocidade de corte
		K10 Ferro fundido cinzento com durezas a cima de 220 HB, aço endurecido, ligas de cobre, plásticos, vidro, porcelana, pedra, borracha	Operações de maquinagem gerais
		K20 Ferro fundido cinzento com durezas até 220 HB, materiais não-ferrosos: cobre, latão, alumínio, borracha	Idem – com avanços e velocidade de corte médias
		K30 Ferro fundido cinzento de baixa dureza, madeira comprimida	Operações de desbaste, corte interrompido e profundo
		K40 Madeira dura ou macia, metais não-ferrosos	Idem – em condições muito desfavoráveis

A partir deste conhecimento é possível descobrir um carboneto de tungsténio teoricamente ideal para a ferramenta de corte, sabendo quais são as características que vão influenciar o modo de produção. Após a escolha do material, torna-se necessário definir uma forma eficaz de efetuar o seu afiamento, porque por muito resistente ao desgaste que seja, irá sempre sofrer desgaste, e ao ser afiado permite uma utilização mais duradoura.

2.6 Afiamento de ferramentas

A partir deste capítulo será feita uma abordagem ao afiamento, como os tipos de afiamento já existentes e as suas características. É de salientar que o afiamento é útil para peças não revestidas, pois caso a peça seja revestida, ao afiar perder-se-ia o revestimento.

O afiamento das ferramentas de corte é essencial para a utilização das mesmas repetidas vezes, obtendo-se um maior aproveitamento. É vital serem corretamente afiadas, senão o tempo de vida será menor e a qualidade de corte também, podendo provocar danos irreparáveis nos pneus e maior esforço para o operador. O afiamento também deve ser o mais rápido possível para diminuir o tempo de não utilização da ferramenta de corte (Ozturk and Chu 2018).

Um método utilizado para o afiamento de carbonetos de tungsténio revestidos por partículas de diamante por CVD, é através de raios de Ar^+ a 3-10 keV, com uma densidade de $0,3 \text{ mA/cm}^2$, que são direcionados a uma ferramenta de corte com um ângulo de corte de 55° , através do processo ilustrado na Figura 46 (Sato et al. 2011).

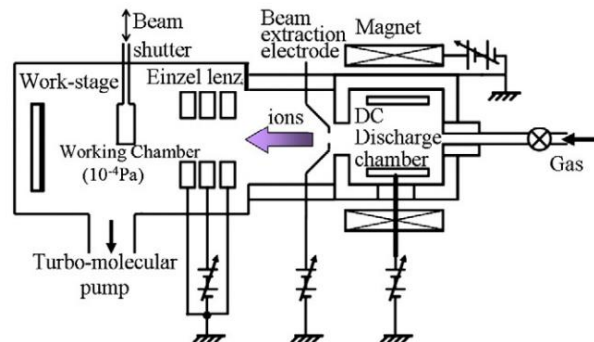


Figura 46- Processo de geração de raios de Ar^+ para afiamento (Sato et al. 2011)

A morfologia da zona de corte através deste processo pode ser vista na Figura 47. Apresenta-se a evolução da mesma à medida que a tensão aumenta. Assim, com o aumento da tensão, a ferramenta de corte fica mais afiada, até que estabiliza por volta dos 60° . À medida que se desce na Figura 47 a), o ângulo de corte diminui, tornando a peça mais afiada.

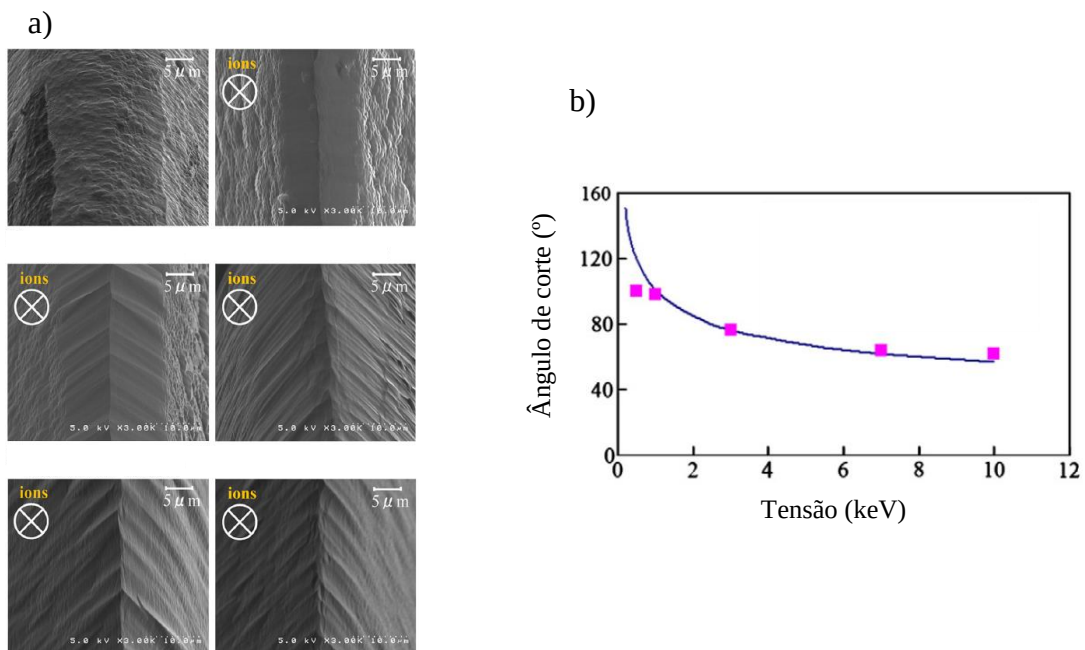


Figura 47- Método de afiamento por raios de Ar^+ : a) Morfologia da aresta de corte; b) Variação do ângulo de corte com a tensão (Sato et al. 2011)

Este método produz bons resultados, no entanto é demasiado dispendioso.

Outro método utilizado para o afiamento é a maquinação eletroquímica. Trata-se de uma ionização controlada do ânodo (peça a afiar) num processo eletrolítico, normalmente sais, governado pela Lei de Faraday. A forma da ferramenta de trabalho é dada à ferramenta de corte sem deposição de material. Deste modo, este processo pode ser realizado num material condutivo, independentemente da sua dureza. Um esquema deste processo pode ser visto na Figura 48.

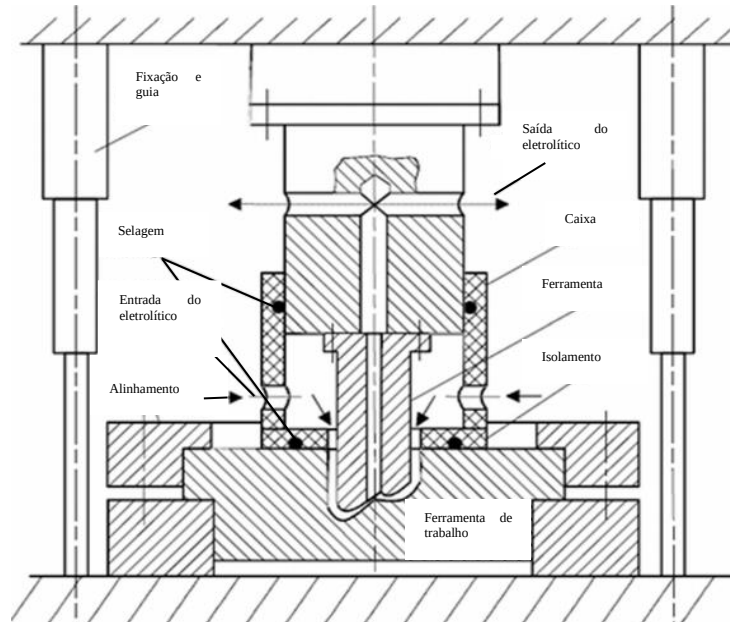


Figura 48- Processo de afiamento eletroquímico (Jain and Pathak 2017)

A máquina é carregada eletricamente e com o meio envolvente dá-se uma ionização que promove a remoção do material da ferramenta de trabalho. Assim, é possível afiar as ferramentas de corte, com controlo da taxa de material removida. Trata-se de um processo semelhante à eletroerosão, e como tal, é bastante dispendioso, apesar de preciso, controlado e independente da dureza das ferramentas de corte.

O método mais comum e utilizado nas ferramentas de corte atuais, é o afiamento por esmeril. Deste modo, a faca é desgastada por abrasão ao entrar em contacto com uma pedra abrasiva rotativa (Figura 49).

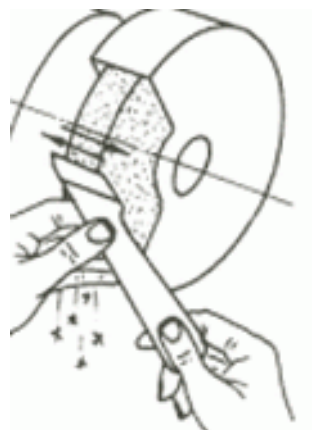


Figura 49- Esquema representativo do processo de afiamento por esmeril (Bhowmik and Naik 2018)

O material da pedra depende do material que se pretende afiar, sendo normalmente em óxido de alumínio, carboneto de silício, nitreto de boro cúbico, diamante sintético e zircónia. É necessário ter em conta a dureza do material e a taxa de material removida requerida. Na Figura 50 é possível verificar as durezas dos abrasivos mais usados (Bhowmik and Naik 2018).

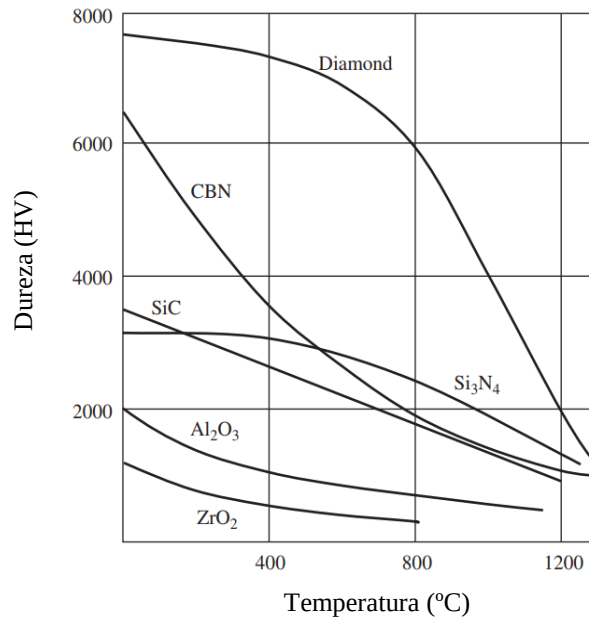


Figura 50- Dureza dos abrasivos utilizados no afiamento por esmeril (Rowe 2014)

Com esta técnica há o problema de o operador afiar a ferramenta de maneira diferente e em tempos diferentes. Assim, o ideal seria a automatização deste processo de modo a sistematizar o ângulo de afiamento e o tempo. É necessário, então, entender qual a velocidade de rotação ideal. O tempo de desbaste depende da quantidade de material que se quer retirar.

Através da análise da Figura 51, observa-se que o coeficiente de atrito diminui com o aumento da velocidade de rotação do esmeril. Este teste foi realizado entre um aço ao manganês e uma pedra abrasiva numa máquina que fixava o tempo de desbaste e a força de contacto (Gu et al. 2015).

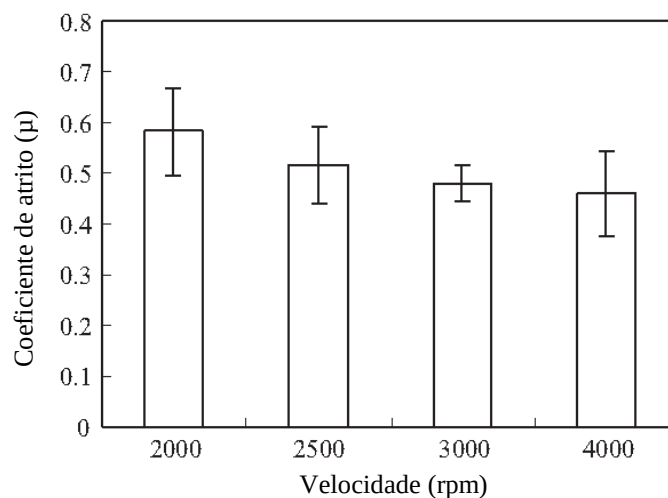


Figura 51- Coeficiente de atrito para diferentes velocidades de rotação (Gu et al. 2015)

Neste estudo também é possível verificar que o aumento da velocidade de rotação, diminui a rugosidade e aumenta a quantidade de material removido. Deste modo concluiu-se que ter uma velocidade de rotação elevada era o ideal, no entanto é preciso ter em conta a temperatura atingida durante o desgaste, como se pode observar na Figura 52. O aumento da velocidade de rotação, aumenta a temperatura, podendo danificar a peça e torná-la inutilizável (Gu et al. 2015).

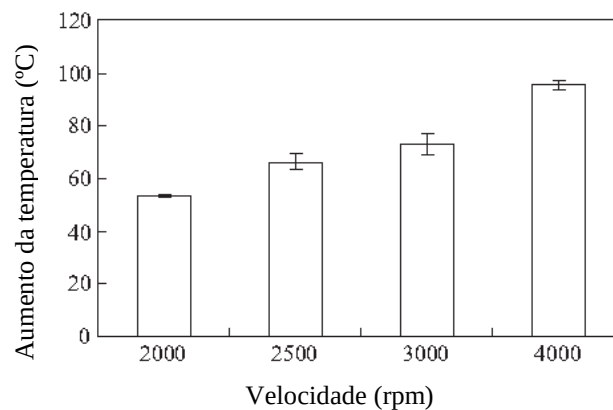


Figura 52- Aumento da temperatura para diferentes velocidades de rotação (Gu et al. 2015)

Deste modo, é necessário optar por uma velocidade de rotação que satisfaça devidamente os diferentes fatores, e assim optou-se por uma velocidade de 2500 rpm como velocidade ideal de rotação.

Os abrasivos de metal duro são fornecidos, maioritariamente, nos materiais abrasivos que se encontram na Tabela 9.

Abrasivo	Indicado para
Óxido de Alumínio	Materiais ferrosos, ligas de alta resistência
Zircónia	Maquinagem de alta velocidade de metais ferrosos e ligas de alta resistência
Carboneto de Silício	Metais não ferrosos (cobre, latão, bronze), materiais de baixa resistência e materiais de alta dureza

Tabela 9- Seleção de abrasivos (Lawson 2003)

Pode-se verificar que o abrasivo mais indicado é o de carboneto de silício, visto que o carboneto de tungsténio se trata de um material de alta dureza. Segundo a Zoeller, o carboneto de silício é o mais adequado para maquinar carboneto de tungsténio (Department).

Atualmente, o método utilizado na Continental é o mais convencional, o afiamento por esmeril. Um operador, no início ou fim do turno, desloca-se ao esmeril e afia a ferramenta ao seu jeito. Assim, o afiamento depende de operador para operador, o que influencia o ciclo de vida da ferramenta, pois a taxa de material removida é arbitrária.

3 Procedimento experimental

Depois de obter a informação teórica necessária da causa do aparecimento de rebarba e de diferentes materiais para o desenvolvimento e otimização de uma ferramenta de corte, é necessário definir o processo de melhoria.

Esta dissertação é a continuação de um trabalho anterior. Nesse trabalho realizou-se numa primeira fase do processo, uma análise prática da ferramenta atual, para perceber melhor o problema. Esta análise pode ser vista no Capítulo 3.1. Compreendeu-se que, de facto, a ferramenta de corte apresenta uma fraca durabilidade, apesar da qualidade de corte ser adequada. Percebeu-se o impacto que este problema causa, pois trata-se de uma etapa da produção sem valor adicionado ao produto que tem custos (Correia 2018). Foram selecionados três aços ligados de trabalho a frio (Vanadis 8, Sleipner e AISI D2) e três variantes de um aço inoxidável (AISI 440C). Foram analisadas as microestruturas, durezas e ensaios de abrasão por esfera rotativa para entender a durabilidade destes. Também foram ensaiados em ambiente real, no qual ferramentas de corte iguais às atuais, feitas do aço selecionado, eram dadas a operadores para o seu uso habitual. Estas ferramentas de corte passaram pelo ciclo habitual de vida (corte + afiamento).

Este trabalho experimental é assim uma continuação do trabalho anteriormente realizado, onde se faz uma análise à rebarba, de modo a compreender as características do material que se quer cortar, a razão da sua elevada abrasividade e tentar identificar materiais de corte adequados.

Com os resultados do trabalho anterior e análise de rebarba, decidiu-se utilizar uma ferramenta de corte com lâmina em carboneto de tungsténio, logo fez-se uma análise a este material e à solução construtiva para a nova ferramenta de corte.

Outro fator que influencia a durabilidade de uma ferramenta de corte é o seu afiamento, logo, tentou-se automatizar esta etapa, que atualmente é manual, de modo a tentar minimizar o erro humano e a sistematizar o processo.

Na Figura 53 são representadas as etapas do procedimento experimental.

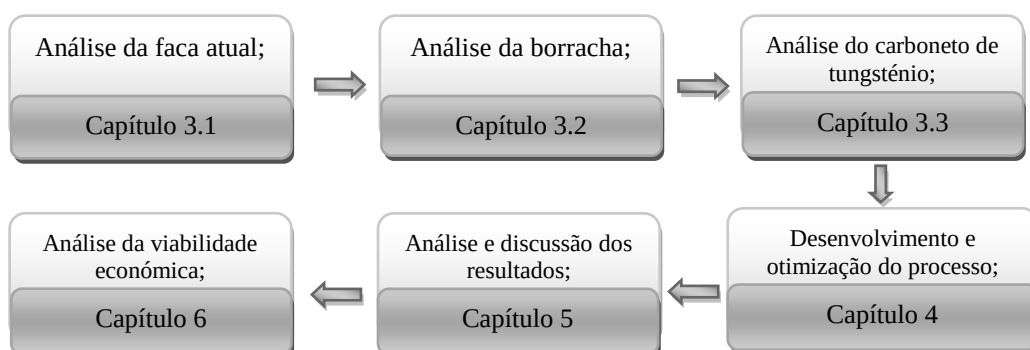


Figura 53- Etapas do procedimento experimental

3.1 Análise à ferramenta de corte atual

O problema desta dissertação surge com a utilização da ferramenta de corte atual, por isso achou-se útil caracterizar a mesma. Para isso aproveitou-se a dissertação anterior a esta, que realizou esta análise, desde a produção da ferramenta ao teste do material em fábrica (Correia 2018).

O material utilizado é um aço C45E, com 3 mm de espessura e com 207 HB de dureza. É também frequentemente conhecido por aço AISI 1045. Na tabela 10 apresenta-se os valores de composição química do aço segundo a norma AISI e segundo o fornecedor das ferramentas para a empresa.

Tabela 10- Composição química do aço CK 45 segundo a norma AISI (Aços 2016) e o fornecedor (Correia 2018)

	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cr+Mo+Ni
Norma AISI	0.42-0.50	≤0.4	0.5-0.8	<0.035	<0.035	≤0.4	≤0.1	≤0.4	≤0.63
Fornecedor	0.42-0.50	<0.035	0.5-0.8	≤0.035	<0.035	-	-	-	-

Através de um punção e de uma matriz é obtido o formato representado na imagem à esquerda da Figura 54. Remove-se a rebarba gerada nesta operação através de um esmeril. De seguida abre-se o rasgo da zona de corte e conforma-se plasticamente através de uma prensa e de uma matriz. A ferramenta é então aquecida através de uma chama oxiacetilénica até que se apresente de cor alaranjada, sendo o bico imediatamente temperado e é, finalmente, afiada de forma manual com uma mó em forma de cunha.

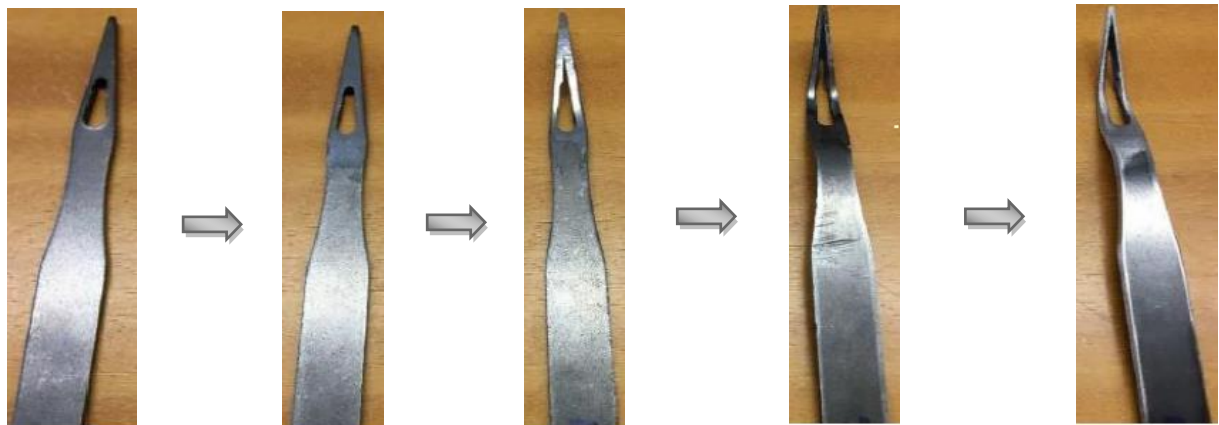


Figura 54- Aspectos da ferramenta após diferentes etapas de produção (Correia 2018)

Na Figura 55 é possível observar as diferentes zonas da ferramenta de corte, tal como ela é utilizada pelo operador. A Figura 55 a) trata-se do modo de utilização genérico para o corte de rebarba na zona do talão, piso e de saídas de ar. Na Figura 55 b) mostra-se o modo usual de corte de rebarba da zona do ombro. No Anexo A encontra-se o desenho técnico desta ferramenta.

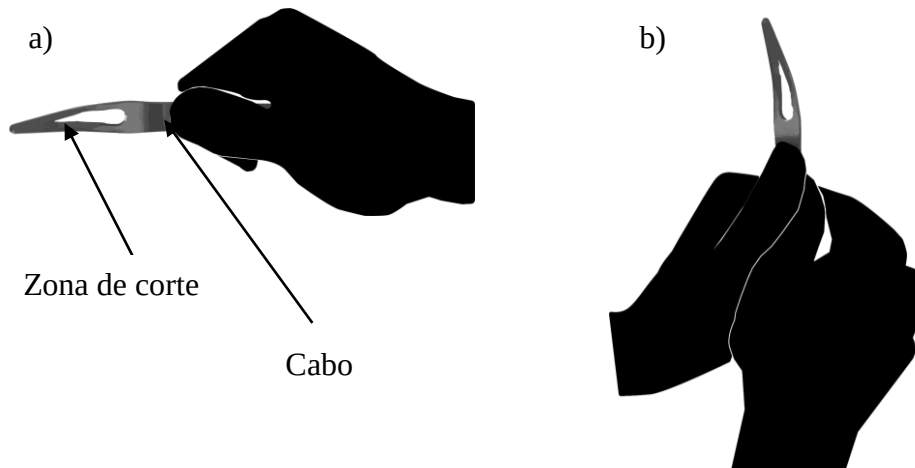


Figura 55- Esquema de operação da ferramenta de corte: a) Para as zonas do talão, saídas de ar e piso; b) Para a zona do ombro

Foram feitas análises de microestrutura, dureza e composição química de uma ferramenta de corte nova e outra usada da Continental. Observando apenas a zona de corte é possível observar na Figura 56 amostras da ferramenta de corte antes e depois do ataque químico (Nital 2%). Verifica-se que a nova ferramenta apresenta poucas inclusões embora tenha uma fissura. A microestrutura é martensítica. A ferramenta usada também apresenta poucas inclusões e uma matriz martensítica. Pode-se assim conquistar que o processo de produção destas ferramentas não é muito controlado, uma vez que chegam a ser fornecidas ferramentas já com fissuras resultantes do fabrico das mesmas.

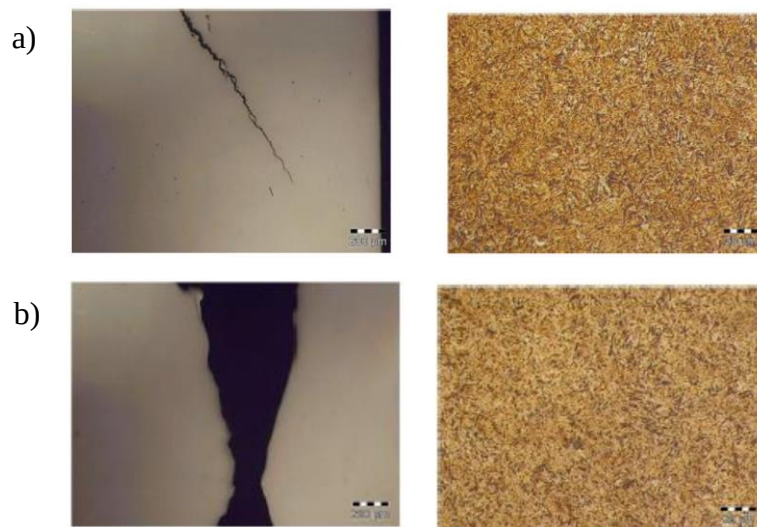


Figura 56- Imagens de microscópio ótico de amostras da ferramenta de corte antes (esquerda) e depois (direita) do ataque químico: a) nova; b) usada (Correia 2018)

Quanto à composição química, obtida através de um espectrómetro de emissão ótica, verificou-se que os valores de carbono são abaixo quer da norma quer do fornecido pelo fabricante sendo que o resto dos elementos se encontram dentro dos valores estabelecidos, como se verifica pela Tabela 11.

Tabela 11- Análise da composição química do aço utilizado na ferramenta de corte atual (Correia 2018)

Amostra	Composição Química																
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe
Nova	0.39	0.16	0.63	0.01	0.004	0.22	0.009	0.04	0.03	0.05	<0.001	0.002	<0.005	<0.005	0.01	<0.01	98.4
Usada	0.38	0.21	0.66	0.02	0.005	0.25	0.003	0.02	0.03	0.02	<0.002	0.002	<0.005	<0.005	0.007	<0.009	98.3

Por fim, analisou-se a dureza através do ensaio de dureza Vickers com cargas de 40 e 20 kgf durante 10 segundos. Os valores no cabo, uma zona não tratada, foram em média de 210 HB, o que ronda os valores do fornecedor (207 HB). Na zona de corte, zona tratada, os valores são apresentados na tabela 12. A variação de valores pode ser explicada pela falta de precisão da têmpera em água e quantidades diferentes de carbono das amostras.

Tabela 12- Durezas das amostras da ferramenta de corte atual (Correia 2018)

Amostra	Dureza (HB)	Dureza (HV)	Dureza (HRC)
Nova	677	724	61
Usada	656	701	60

Após análise da ferramenta atual, recorrendo ao trabalho anterior, fez-se a análise do material a cortar, a borracha utilizada nos pneus.

3.2 Análise ao composto de borracha

Depois de analisada a faca atual é necessário entender a razão da abrasividade de um pneu que faz com que a ferramenta de corte se desgaste tão rapidamente. Então, analisou-se a microestrutura do composto de borracha.

Na análise de microestrutura do pneu, recorreu-se ao CEMUP (Centro de Materiais da Universidade do Porto) que tem disponíveis microscópios eletrónicos de varrimento, permitindo uma grande resolução de imagem e perceção da microestrutura. Através da participação em dois seminários providenciados pelo CEMUP, foi possível entender em que consiste esta análise.

Nesta análise, um feixe de eletrões faz um varrimento na amostra de modo a libertar os seus eletrões ao longo da mesma e formar a imagem. A energia deste feixe controla a profundidade de difusão dos eletrões na amostra. Quanto maior a energia, maior a profundidade.

Os eletrões libertados são de vários tipos como indica a Figura 57, sendo que os resultados obtidos foram imagens através de eletrões retrodifundidos, sendo possível distinguir a composição da amostra.

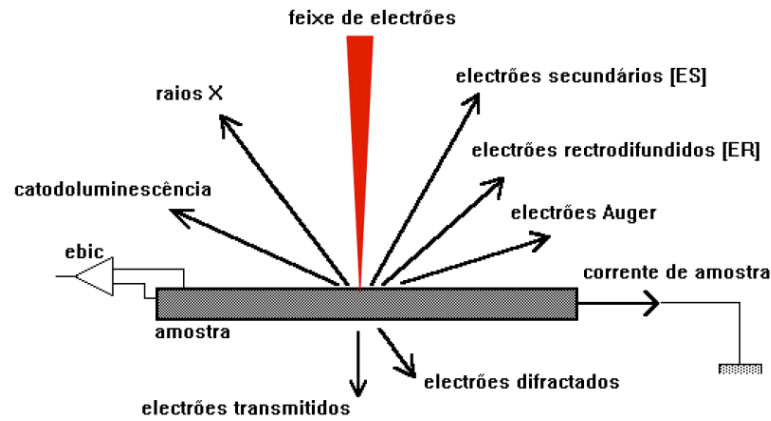


Figura 57- Radiações emitidas pela amostra num microscópio SEM

Foram fornecidos ao CEMUP duas amostras de rebarba, uma de um pneu de verão e outra de um pneu de inverno. O CEMUP analisou e os resultados são mostrados e discutidos no Capítulo 5.1.

3.3 Análise de dureza ao carboneto de tungsténio

Após a análise do composto de borracha de um pneu, é necessário analisar o material cortante. Para isso realizaram-se ensaios de dureza, visto que do conhecimento bibliográfico sabe-se que é um dos fatores de desempenho da ferramenta de corte, pois está relacionada com a resistência ao desgaste.

Como será visto no Capítulo 4.1, a Frezite é a empresa responsável pela produção e ajuda no desenvolvimento da nova ferramenta de corte. Assim, foi fornecida uma amostra do carboneto de tungsténio utilizado (K10) proposto pela empresa produtora da ferramenta. A análise de dureza foi feita no laboratório de ensaios tecnológicos do DEMec, segundo a escala Vickers com uma carga de 50 kgf. Recorreu-se ao equipamento *Die Testor 2 RC* (Figura 58).



Figura 58- Durómetro Die Testor 2 RC presente no laboratório de ensaios tecnológicos do DEMec

3.4 Teste em ambiente real

Para finalizar a análise do desenvolvimento da ferramenta de corte é necessário testá-la em ambiente real. Assim, foi possível otimizá-la.

Antes de explicar a metodologia do teste realizado, é importante referir o procedimento habitual de um operador. Estes, possuem normalmente entre 10 a 20 ferramentas de corte, das quais usam uma até necessitar de ser afiada, permitindo inspecionar, em média, 77 pneus. Quando esta perde o poder de corte, o operador começa a trabalhar com outra, e assim sucessivamente. O afiamento das ferramentas é efetuado no final ou início do turno, dependendo do operador. Em média, uma faca é afiada 8 vezes.

O teste em ambiente real da nova ferramenta de corte consistiu em fornecê-la a um operador e contabilizar quantos pneus conseguia cortar. Devido à dificuldade de adaptação a mudanças dos operadores, o teste terminava sempre que o operador se sentia desgastado, quando sentia que estava a exercer maior esforço que na ferramenta atual. Deste modo, utilizaram-se vários operadores, transmitindo a ferramenta entre eles dentro do turno ou entre turnos. Assim, a ferramenta de corte estava sempre em teste e conseguia-se recolher diferentes *feedbacks* que ajudaram na sua otimização. Os operadores foram escolhidos com ajuda dos supervisores, consoante a sua experiência e capacidade de colaboração. Ao todo, colaboraram 5 operadores.

O método de corte da rebarba do pneu consiste na utilização da ferramenta de corte segundo a Figura 59, semelhante à atual.

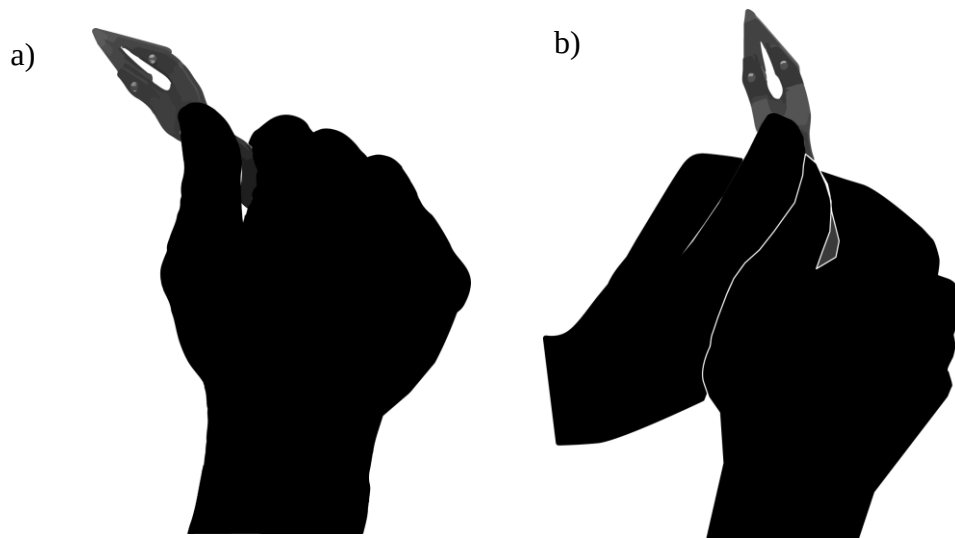


Figura 59- Método de utilização da nova ferramenta de corte: a) Para as zonas do talão, saídas de ar e piso; b) Para a zona do ombro

Assim, conclui-se a explicação do procedimento experimental desta dissertação. De seguida, demonstra-se o desenvolvimento e otimização do processo global de corte.

4 Desenvolvimento e otimização do processo de corte

O objetivo desta dissertação é a otimização de uma ferramenta de corte que é atualmente utilizada no corte de rebarba de um pneu. Deste modo, uma vez que já foi feita uma abordagem ao procedimento experimental utilizado é necessária a apresentação de soluções construtivas para a ferramenta.

Para além da otimização da ferramenta, achou-se que a etapa de afiamento destas prejudicava a sua durabilidade, e assim projetou-se uma máquina de afiamento automática.

4.1 Soluções para a ferramenta de corte

Inicialmente, a solução para a ferramenta de corte seria manter o *design* atual e apenas modificar o material. No entanto, com a possibilidade de a ferramenta de corte ser em carboneto de tungsténio, não se tornaria viável devido ao elevado custo do material e peso. Assim, pensou-se numa solução em que envolvesse duas peças: uma em aço de baixo custo na zona não utilizada no corte, fixa, chamada de cabo; e outra em carboneto de tungsténio na zona de corte, amovível, chamada de lâmina.

Deste modo, seria possível fabricar uma lâmina em carboneto de tungsténio, tornando-se menos dispendioso. A lâmina podia ser afiada em separado e fora do processo de corte. Também faria com que o cabo seja uma peça de duração elevada, que só necessite de ser trocada caso se parta ou se danifique.

Com isto, foram projetadas ferramentas de corte em que se tentou minimizar as diferenças em relação ao *design* da ferramenta de corte atual para não influenciar o operador durante o corte.

Durante o projeto verificou-se a necessidade de encontrar um sistema de fixação da lâmina rápido, fiável e duradouro. Também se verificou que é possível separar o projeto da lâmina do projeto do cabo. Assim, dois estudantes do Mestrado em Design Industrial e de Produto da Universidade do Porto, ficaram responsáveis por esses dois projetos: fixação da lâmina e ergonomia do cabo.

Na Figura 60 é possível observar a primeira solução projetada. Nesta solução a lâmina é colocada por baixo. O cabo tem um ângulo lateral que faz com a lâmina não caía. Nesta solução seria necessário um sistema de fixação para não permitir a saída da lâmina.

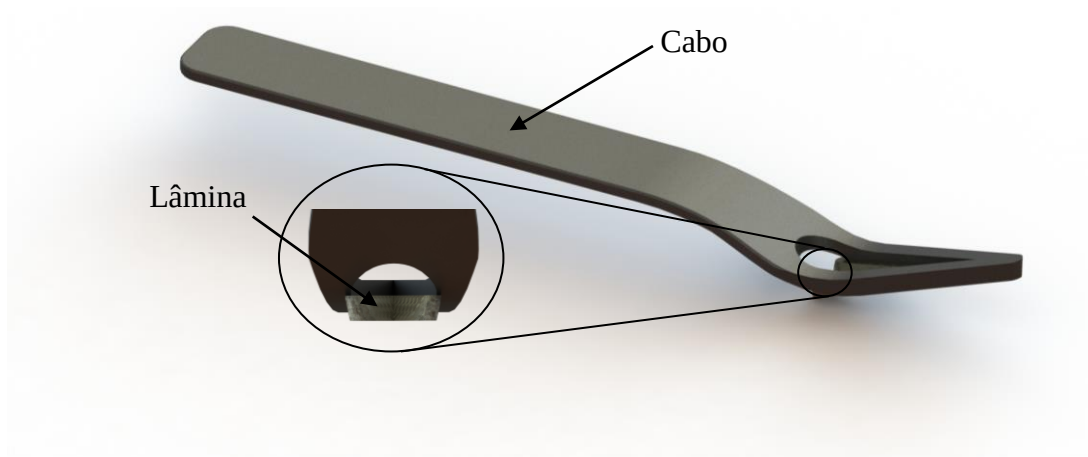


Figura 60- Protótipo da ferramenta de corte com lâmina inferior

Para além do projeto deste protótipo, surgiu a possibilidade de um novo protótipo semelhante, mas com a lâmina a ser inserida por cima. Nesta situação a lâmina tem um entalhe de modo a garantir o encaixe numa das pontas e teria de haver um sistema de fixação na outra ponta. O posicionamento dela é garantido por um degrau na mesma. Na Figura 61 é possível verificar este protótipo.

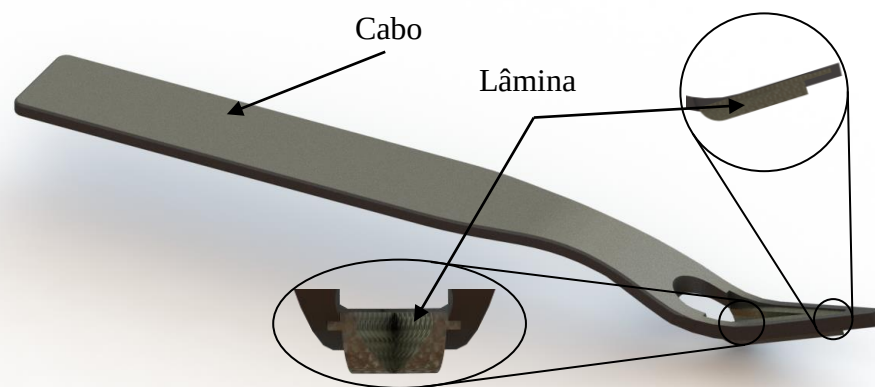


Figura 61- Protótipo da ferramenta de corte com lâmina superior

A partir dos conceitos teóricos e face a estas novas ideias, passou-se à fase de produção. Para isso, entrou-se em contacto com a Palbit, no entanto não houve disponibilidade da parte da empresa para o fabrico da ferramenta no período desta dissertação. Assim, contactou-se a Frezite onde o projeto foi recebido e desenvolvido.

No Anexo A encontra-se o desenho técnico do primeiro protótipo desenvolvido pela Frezite. Foi adaptado e corrigido porque se encontrava com uma geometria que impedia de cortar a rebarba do pneu e poderia danificá-lo, retirando-se um parafuso de cada lado e tornando a lâmina mais pontiaguda. Deste modo, um segundo protótipo da Frezite foi desenvolvido e, então, produzido, tal como se observa na Figura 62. Apesar deste protótipo satisfazer os requisitos, após uma tentativa de corte de rebarba, concluiu-se que era incapaz de o fazer. Recolheram-se as observações do operador e as suas sugestões de correção. Notou-se que seria necessário aumentar o ângulo de abertura da lâmina na zona de corte de modo a que a rebarba se oriente para essa zona com maior facilidade.



Figura 62- Primeiro protótipo produzido pela Frezite

Após a alteração da abertura da zona de corte a ferramenta de corte tinha o seguinte aspeto (Figura 63).



Figura 63- Primeiro protótipo produzido pela Frezite com as primeiras alterações

Apesar de a alteração ser ligeira, teve um impacto significativo nos resultados. Esta ferramenta de corte foi capaz de cortar a rebarba de um pneu facilmente e, então, passou-se à fase de testes da mesma em grande escala (Teste 1). Apesar de se ter tentado manter o cabo semelhante ao da ferramenta de corte atual, o operador foi sensível à diferença, e como adaptação utilizava a ferramenta até ao ponto de se sentir cansado, trocando pela ferramenta de corte atual até ter descansado o suficiente e voltar a utilizar a nova ferramenta. Os resultados deste teste podem ser vistos e discutidos no Capítulo 5.

Após o término do Teste 1, foi recolhido o *feedback* do operador. Concluiu-se que o carboneto de tungsténio é um material com bom desempenho de corte da rebarba de pneu, pois cortava muito facilmente o composto de borracha. No entanto, a geometria da ferramenta de corte foi a que teve aspeto mais negativo. Na zona de corte, a lâmina era larga e pouco comprida, o que implicava maior esforço por parte do operador para alcançar corretamente a rebarba. Foram recolhidos *feedbacks* de outros operadores que corroboraram o operador do Teste 1. Deste modo, seria necessária essa mudança na lâmina o que implicaria também uma mudança de geometria no cabo, na zona de ligação com a lâmina.

Assim, a ferramenta de corte foi otimizada como se observa na Figura 64. Nas zonas assinaladas o material foi desbastado de modo a estreitar a lâmina e a reduzir a área de contacto com o pneu (Chanfro de 1 mm x 30°).



Figura 64- Primeiro protótipo produzido pela Frezite com as segundas alterações

Esta ferramenta foi sujeita novamente a um teste (Teste 2) para entender se havia melhoria. Para isso, para além das melhorias, a ferramenta de corte foi afiada pela Frezite. O afiamento faz-se através da remoção de material na parte inferior da lâmina, em ambiente controlado. A lâmina é fixada num gabarito e uma pedra abrasiva retira material até se atingir 0.1 mm de espessura de material retirado. Tal como no teste anterior, os resultados podem ser vistos e discutidos no Capítulo 5.

Concluindo-se o Teste 2, foi novamente recolhido o *feedback* do operador. Salienta-se o poder de corte da lâmina, no entanto os problemas com a sua geometria mantiveram-se. O operador continuava a exercer muito esforço para alcançar alguma rebarba. Não houve uma melhoria significativa em relação ao primeiro teste. Deste modo, foi necessária a produção de uma nova ferramenta de corte, pois tinha-se chegado ao limite de alterações possíveis no primeiro protótipo. Era necessário alterar a geometria, tornando-a mais estreita e pontiaguda.

Não foi possível testar este último protótipo no período desta dissertação.

Termina-se assim a explicação do procedimento experimental realizado com a nova ferramenta de corte. De seguida, projeta-se uma solução para o afiamento.

4.2 Solução para o afiamento

De modo a automatizar o afiamento, projetou-se uma máquina. O método projetado é semelhante ao utilizado atualmente, onde a lâmina entra em contacto com uma mó abrasiva rotativa e retira material de modo a afiar. A diferença é que o tempo de afiamento e o posicionamento da lâmina são automatizados.

Antes do devido dimensionamento, mostra-se na Figura 65 um esquema da máquina de afiamento de modo a entender os diferentes cálculos que vão ser efetuados de seguida.

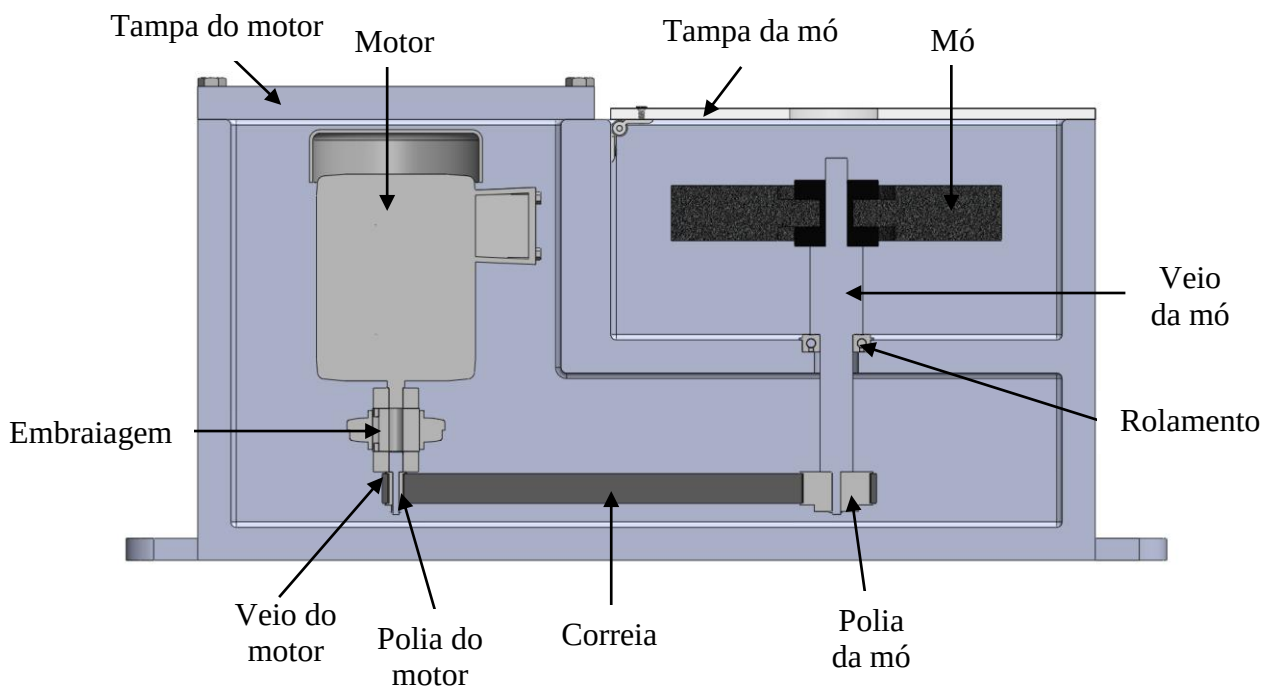


Figura 65- Esquema da máquina de afiamento

Como já se mencionou, as velocidades ideais de rotação rondam as 2500 rpm contra o sentido de corte (Gu et al. 2015). Após rápida análise de mercado, também se concluiu que o melhor abrasivo para afiar o carboneto de tungsténio é o carboneto de silício, possuindo um

coeficiente de atrito máximo entre eles de $\mu=0,15$ (Department). Calculou-se o binário que o motor teria de aguentar devido à força de atrito na mó, que é feita no momento de contacto entre esta e a lâmina, sendo:

$$N=mg=5 \times 10=50 \text{ N} \quad (1)$$

$$F_a=\mu \times N=0.15 \times 50=75 \text{ N} \quad (2)$$

$$\text{Binário}= F_a \times \text{braço}=75 \times 0.1=0.75 \text{ Nm} \quad (3)$$

Sendo N a força normal onde se considerou $m=5 \text{ kg}$ de peso que a lâmina provoca, g a constante de gravidade, F_a a força de atrito e supondo que a lâmina será afiada a 0.1m (braço) de distância do centro de rotação da mó.

Assim, encontrou-se um motor AC do fornecedor RS, designado pelo fabricante por ALTA - 0063 M1 - 10002- IZ (Anexo B). Deste modo, é necessário haver uma pequena razão de transmissão entre o motor e a mó, logo é necessária a utilização de um sistema de polias entre os mesmos. Para isso, utilizou-se um programa que cálculo que fornece toda a informação. Foi então escolhida uma correia com nervuras em borracha 4 PH 1200 Lp, uma polia com nervuras para buchas paralelas 4 PH 112 e uma polia com nervuras para buchas paralelas 4 PH 125. A Figura 66 e a Tabela 13 mostram as características das correias e polias escolhidas.

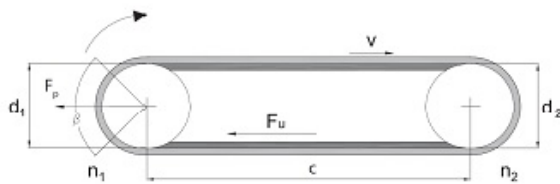


Figura 66- Dimensões de correias e polias segundo a Dunlop (Dunlop 2016)

Tabela 13- Dimensões das características das correias e polias escolhidas (Dunlop 2016)

Características	Dimensões
d1 (mm)	112
d2 (mm)	125
c (mm)	414
n1 (motor) (rpm)	2785
n2 (mó) (rpm)	2495
v (m/s)	16.57
Largura (b) (mm)	7.40
Razão transmissão	1.12
Carga no veio (N)	Estática 63
	Dinâmica 27

Após a escolha da correia e polias, é necessário dimensionar os veios, quer do motor, quer da mó. Utilizando o critério da rigidez, é possível calcular o diâmetro mínimo dos veios (dv) (Ferreira 2016):

$$[dv] = 129,6 \sqrt[4]{\frac{P[Kw]}{n[rpm]}}$$

Sendo a potência $P=0.25 \text{ kW}$ e as velocidades da mó de $n=2785 \text{ rpm}$ e $n=2500 \text{ rpm}$. A Tabela 14 indica os valores calculados.

Tabela 14- Determinação dos diâmetros mínimos dos veios (critério de rigidez)

	n (rpm)	dv calculado (mm)
Veio motor	2785	12.62
Veio mó	2500	12.96

De modo a evitar empenamentos do veio do motor, colocou-se uma embraiagem entre o veio do motor e o veio da polia, no entanto, é necessário que se encontre dentro dos valores de binário do motor. Assim, selecionou-se uma embraiagem com um binário máximo de 2.8 Nm (McMaster-Carr 2013). Esta permite o tensionamento da correia sem que haja desalinhamento e empeno dos veios do motor e da polia. No Anexo B encontra-se o desenho técnico da mesma.

De maneira a assegurar a transmissão de potência são necessárias chavetas, que precisam de ser dimensionadas. Consideraram-se chavetas paralelas ISO R 773 tipo A, fabricadas em aço C3 com as seguintes características (Tabela 15).

Tabela 15- Tensão de cedência do aço C3 (Aços 2016)

Aço	Tensão limite de elasticidade (MPa)
C3	300

Para o correto dimensionamento, é necessário ter em conta os esforços de corte e esmagamento, e calcular o comprimento mínimo admissível da chaveta que aguenta esses esforços. As expressões que permitem calcular esses esforços são as seguintes (Ferreira 2016). Utilizou-se um coeficiente de segurança de 1.5.

Dimensionamento ao corte:

$$L_{min} = \frac{2 M_t}{d_{veio} \cdot b \cdot \tau_{adm}} \quad \tau_{adm} = \frac{\sigma_{ced}}{\sqrt{3} \cdot c \cdot s}$$

Dimensionamento ao esmagamento:

$$L_{min} = \frac{2 M_t}{d_{veio} \cdot (h - t1) \cdot \sigma_{adm}} + b \quad \sigma_{adm} = \frac{\sigma_{ced}}{c \cdot s}$$

Os parâmetros utilizados para o cálculo apresentam-se na Tabela 16 com ajuda da Figura 67.

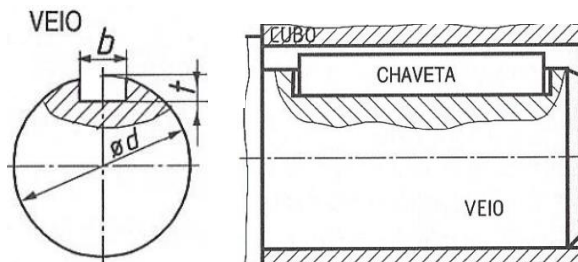


Figura 67- Dimensões característica para veios e chavetas (Morais 2012)

Tabela 16- Parâmetros para a definição do comprimento mínimo da chaveta (Morais 2012)

	d (mm)	Mt (Nmm)	b (mm)	h (mm)	t (mm)	L mínimo (mm)
Veio mó	12.96	870	5	5	3	10
Veio motor	12.62	870	5	5	3	10

Os valores calculados foram os indicados na Tabela 17.

Tabela 17- Escolha das chavetas (Morais 2012)

	L min. Corte (mm)	L min. Esmagamento (mm)	L normalizado (mm)	Norma
Veio mó	0.233	5.336	15	A ISO R 773 5x5x15
Veio motor	0.239	5.345	15	A ISO R 773 5x5x15

De notar que o L normalizado é igual a $L_{min}+b$.

O passo seguinte é dimensionar o rolamento, no entanto é necessário perceber quais são os esforços a que estará sujeito. Na Figura 68 são perceptíveis os esforços que o veio da mó está sujeito.

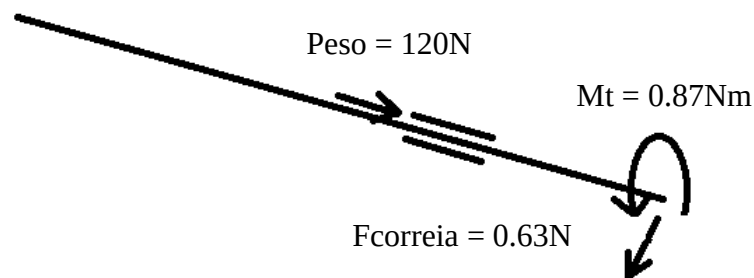


Figura 68- Esforços que o veio da mó está sujeito

É de notar que o peso foi calculado para um veio num aço FR3. O peso do veio foi calculado para o diâmetro máximo do veio (48 mm), para o peso específico do aço ($\rho=7860 \text{ kg/m}^3$) e comprimento de 323.25 mm. Para além do peso do veio foi adicionado o peso médio de uma mó de 30 cm de diâmetro em carboneto de silício (7 kg). A $F_{correia}$ foi obtida com recurso à Tabela 13. Recorrendo ao programa MD Solids foi possível retirar o diagrama de momentos do veio como se mostra na Figura 69.

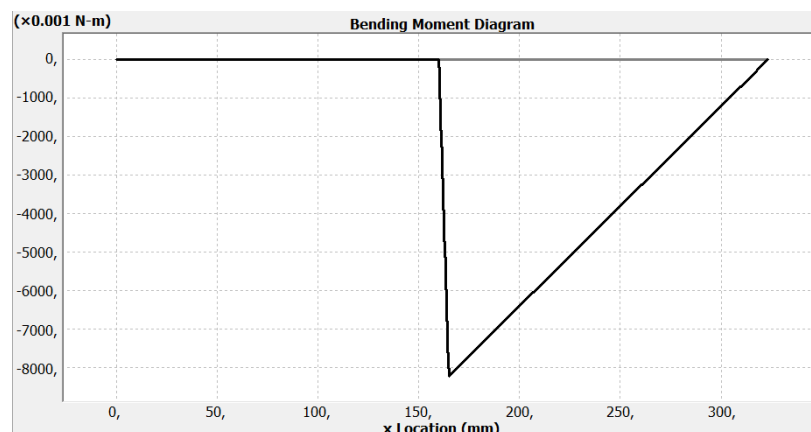


Figura 69- Diagrama de momentos do veio da mó (Software 2013)

Verifica-se que o momento máximo é de -8.24 Nm para x=165 mm.

Para dimensionar o rolamento é necessário comparar a capacidade de carga dinâmica do rolamento com a carga solicitada. A carga solicitada vem como:

$$C_s = \frac{P \times f_L}{f_n}$$

Em que P é a carga dinâmica equivalente, f_L e f_n são o fator dinâmico e de rotação respetivamente.

$$f_L = \sqrt{\frac{L_h}{500}}$$

$$f_n = \sqrt[3]{\frac{33^{1/3}}{n}}$$

Onde L_h é o número de horas para o qual o veio foi planeado e n a velocidade de rotação do rolamento em rpm.

A carga dinâmica equivalente é calculada a partir da seguinte expressão:

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

F_r e F_a são o esforço axial e radial a que o rolamento está sujeito. X e Y são fatores definidos pelo fabricante. Foi escolhido o fabricante SKF, e a Figura 70 indica os valores anteriores.

Fatores de cálculo para rolamentos rígidos de esferas

Rolamentos de uma e de duas carreiras Folga normal

$f_0 F_a / C_0$	e	X	Y
0,172	0,19	0,56	2,3
0,345	0,22	0,56	1,99
0,689	0,26	0,56	1,71
1,03	0,28	0,56	1,55
1,38	0,3	0,56	1,45
2,07	0,34	0,56	1,31
3,45	0,38	0,56	1,15
5,17	0,42	0,56	1,04
6,89	0,44	0,56	1

Figura 70- Fatores radial e axial dos rolamentos fixos de esferas (catálogo SKF (SKF 2015))

C_0 representa a capacidade de carga estática do rolamento, e, a folga e F_0 um fator do rolamento definido pelo fabricante.

Para a seleção do rolamento, optou-se por rolamentos rígidos de uma carreira de esferas, devido aos baixos esforços sujeitos e ao baixo custo de aquisição. Como ponto de partida selecionou-se o rolamento 61806. A Tabela 18 demonstra os cálculos efetuados.

Tabela 18- Dimensionamento do rolamento 61806

Fa	Fr	Fo	Co	FoFa/ Co	e	X/Fr	Fa/Fr	Y	P	Lh	n	fL	fn	Cs	C
0.120	0.063	14	2.900	0.579	0.247	1.905	0.560	1.799	0.181	10000	2500	4.472	0.089	0.024	4.490

Os valores tabelados foram retirados do catálogo SKF. Como se verifica, a carga solicitada é superior à carga máxima do rolamento, logo este rolamento está fora de questão.

Procurou-se um rolamento maior, que aguentasse mais carga, e assim, selecionou-se o rolamento 61810. A Tabela 19 demonstra os cálculos efetuados.

Tabela 19- Dimensionamento do rolamento 61810

Fa	Fr	Fo	Co	FoFa/ Co	e	X/Fr	Fa/Fr	Y	P	Lh	n	fL	fn	Cs	C
0.120	0.063	17	6.800	0.300	0.212	1.905	0.560	2.207	0.206	10000	2500	4.472	0.089	10.308	6.760

Como se verifica este rolamento também não é adequado pois a carga solicitada é maior que a carga máxima. Procurou-se um rolamento ainda maior e selecionou-se o rolamento 61812. A Tabela 20 demonstra os cálculos efetuados.

Tabela 20- Dimensionamento do rolamento 61812

Fa	Fr	Fo	Co	FoFa/ Co	e	X/Fr	Fa/Fr	Y	P	Lh	n	fL	fn	Cs	C
0.120	0.063	17	11.400	0.179	0.302	1.905	0.560	2.284	0.211	10000	2500	4.472	0.089	10.550	11.900

Este rolamento cumpre os requisitos, logo foi o selecionado. A Tabela 21 e a Figura 71 mostram as características deste rolamento. No anexo B, encontram-se os seus dados técnicos.

Tabela 21- Características do rolamento 61812 (SKF 2015)

d (mm)	D (mm)	B (mm)	d1 (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	Peso (Kg)
60	78	10	65.6	72.4	-	0.11

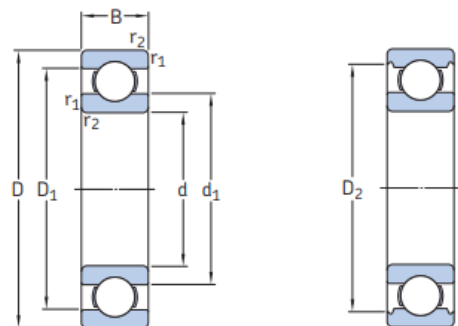


Figura 71- Esquema representativo das dimensões de um rolamento (SKF 2015)

De seguida, é necessário efetuar a análise dos veios à flexão e saber qual a flecha associada aos esforços que eles estão sujeitos (Figura 68). Após os cálculos anteriores das suas dimensões mínimas, e posterior projeto, as dimensões dos veios encontram-se no Anexo B. Para verificação da flecha utilizou-se novamente o programa MD Solids (Software 2013). Na Figura 72 é possível verificar os valores da flecha de ambos os veios.

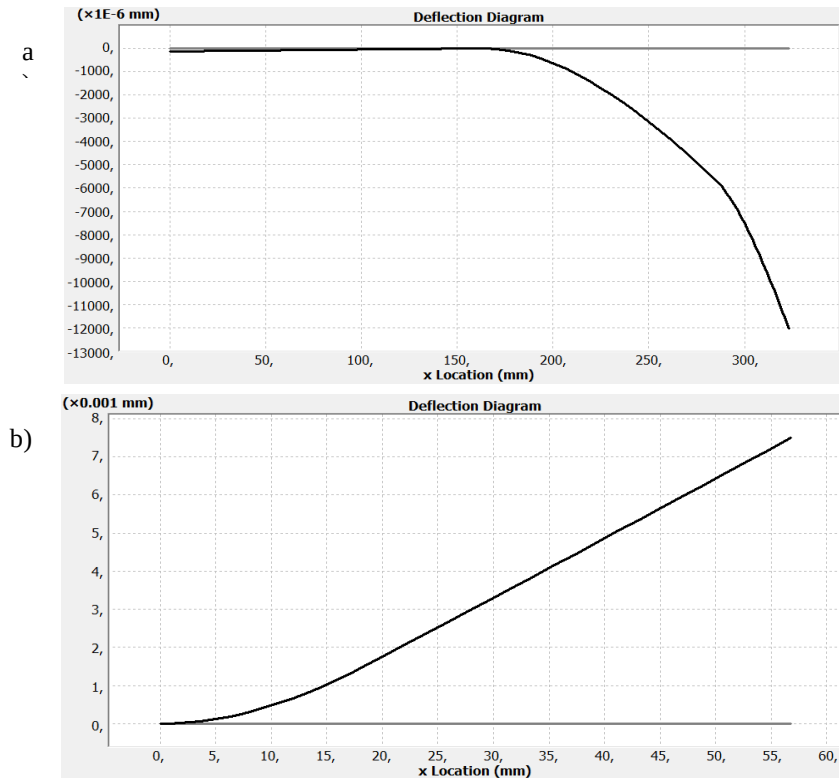


Figura 72- Flecha dos veios: a) da mó; b) do motor (Software 2013)

Como se verifica, a flecha de 0.012 mm no veio da mó e de 0.008 mm no veio do motor, são insignificantes. Logo, as dimensões do veio estão dentro do aceitável.

De seguida é necessário verificar se o veio resiste à fadiga. A análise da fadiga é de extrema importância quando existem situações cíclicas dado que as mesmas podem dar início ao aparecimento de fendas e propagação das mesmas. Através da reta de Soderberg admite-se que uma solicitação caracterizada por uma tensão normal média (σ_m) e uma tensão normal alternada (σ_a) pode ser substituída por uma tensão normal estática equivalente. Tal é passível de ser aplicada para o caso da tensão de corte estática equivalente.

$$\sigma_{Est.}^{Equivalente} = \sigma_m + \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{f0}} \sigma_a$$

$$\tau_{Est.}^{Equivalente} = \tau_m + \frac{\tau_{ced}}{\tau_{f0}} \tau_a$$

$\sigma_m = Fx/A$, onde Fx é o esforço axial do veio e A a área da secção

$\sigma_a = 32Mf/\pi d^3$, em que Mf é o momento fletor da secção em análise e d o diâmetro da mesma

$\tau_m = 16Mt/\pi d^3$ onde Mt é o momento tisor da secção. Este é constante ao longo do veio, logo $\tau_a = 0$

$\sigma_f = \sigma_{rot}/2$ (σ_f é a tensão normal limite de fadiga e σ_{rot} a tensão de rotura)

Como as expressões para efetuar o cálculo das tensões estáticas equivalentes são apenas verdadeiras para provetes com diâmetros e características normalizadas é necessário introduzir fatores de correção para as ajustar ao caso em estudo.

C1 – Tipo de carga - para o caso de flexão considera-se $C1=1$

C2 – Efeito do tamanho, obtido através da Figura 73:

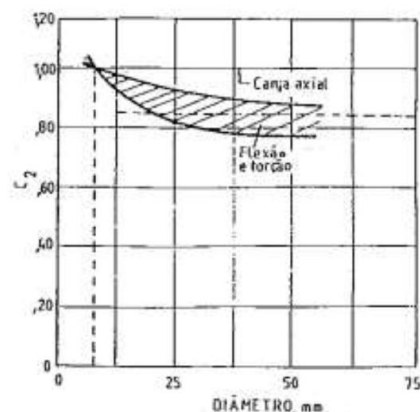


Figura 73- Gráfico para a obtenção de C2 (Castro 2014)

C3 – Efeito do acabamento superficial, dado pela Figura 74:

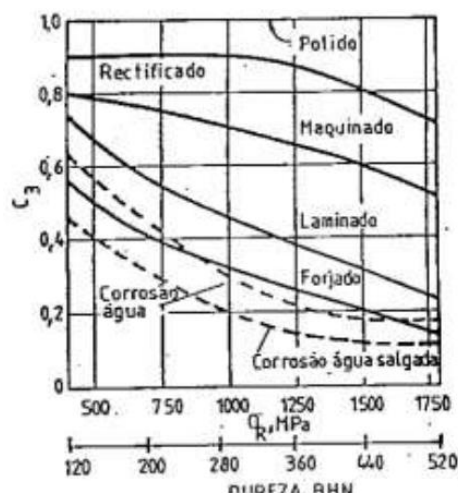


Figura 74- Gráfico para a obtenção de C3 (Castro 2014)

Os veios utilizados são obtidos por maquinagem porém, são retificados nas zonas de concentração de tensões, portanto considera-se que os veios são retificados (pior situação).

C4 – Outras correções

Caso existam outras correções a fazer tal como presença de defeitos, condições de serviço, etc. Sendo que $C4 \leq 1$, considerou-se que este seria igual a 1.

Depois de obtidos todos os parâmetros de correção é necessária correção do valor da tensão normal limite de fadiga:

$$\sigma_{c_{f0}} = \sigma_{f0} \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4$$

A presença de escatéis e mudanças de secção do veio utilizadas devido ao tipo de solução construtiva criam concentração de tensões. De modo a contabilizar estes efeitos utilizam-se fatores de concentração de tensões teóricos (K_t), obtidos através da Figura 75.

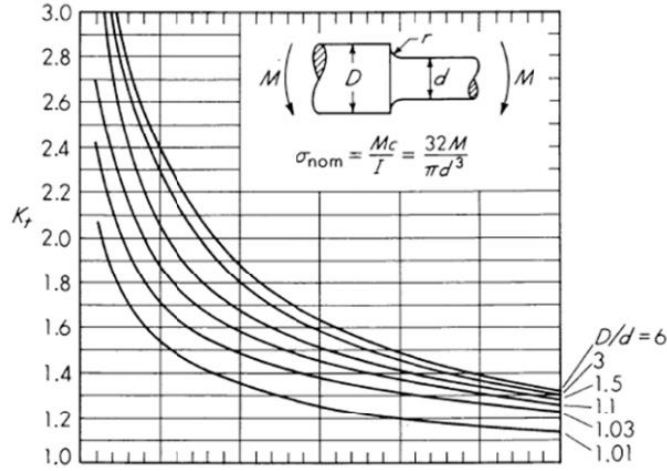


Figura 75- Fator de concentração de tensões teóricas para uma solicitação de flexão em função (Castro 2014)

Dadas as correções efetuadas é necessário calcular as tensões estáticas equivalentes corrigidas, através das expressões:

$$\sigma_{Est.}^{Equivalente} = \sigma_m + \frac{\sigma_{ced}}{\sigma_{f0}} K_f \cdot \sigma_a$$

$$\tau_{Est.}^{Equivalente} = \tau_m + \frac{\tau_{ced}}{\tau_{f0}} K_f \cdot \tau_a$$

Sendo o parâmetro K_f (fator de concentração de tensões prático) igual a 1. Aplicando o critério de Tresca é possível comparar a tensão máxima ($\sigma_1 - \sigma_3$) com a tensão de cedência do material:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq \frac{\sigma_{ced}}{N}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq \sqrt{\left(\frac{\sigma_{Est.}^{eq}}{2}\right)^2 + \tau_{Est.}^{eq\ 2}}$$

O coeficiente de segurança utilizado foi de 1.5, pois, segundo a bibliografia é o mais adequado. Na tabela 22 foi calculada a tensão máxima de modo a analisar o veio à fadiga.

Tabela 22- Resultados da análise à fadiga

	Veio motor	Veio mó
C2	0.95	0.95
x crítico (mm)	0	165
D (mm)	13	13
A (mm ²)	132.7322896	132.73229
Kt	1.6	1.6
Kf	1.6	1.6
σ_{cf0} (MPa)	350.55	350.55
Mt (Nmm)	0.87	0.87
Fx (N)	0	120
Mf max (Nmm)	2953.6	8236.8
σ_m (MPa)	0	0.9040754
τ_m (MPa)	0.002016784	0.0020168
σ_a (MPa)	13.69372897	38.188146
σ_{eq} (MPa)	18.75050608	53.194219
τ_{eq} (MPa)	0.002016784	0.0020168
$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	9.375253258	26.59711
σ_{ced}/N (MPa)	200	200

Como se verifica, os veios estão corretamente dimensionados para que não haja rotura à fadiga.

Para finalizar o projeto da máquina são de salientar alguns aspetos visíveis na Figura 65, no início deste Capítulo. Achou-se necessária haver separação entre o motor e a mó de modo a esconder o motor, diminuir o ruído, facilitar o acesso a cada um e aumentar a segurança. Logo, a máquina terá dois compartimentos: o do motor fechado de um lado por uma tampa fixa por parafusos, e fechado de outro lado por uma grade fixada por parafusos de maneira a proteger, facilitar a libertação de calor e permitir o ajuste da correia; o da mó, tapado por uma tampa transparente fixada por dobradiças para permitir a sua abertura para trocar a mó e com dois orifícios para possibilitar a entrada das lâminas a afiar. Nos veios são utilizados anéis elásticos de modo a fixar os elementos, pois ocupam menos espaço e porque não há carga elevada nessas zonas. De modo a ajustar a tensão da correia será utilizado um tensionador. A caixa terá quatro patas para fixá-la à base.

Concluída a etapa de dimensionamento, é necessário apresentar soluções construtivas. Nas Figuras 76 e 77 é possível verificar os veios montados.

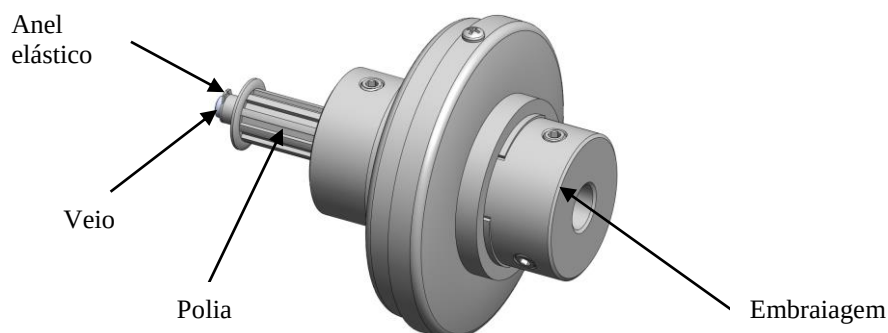


Figura 76- Veio motor montado

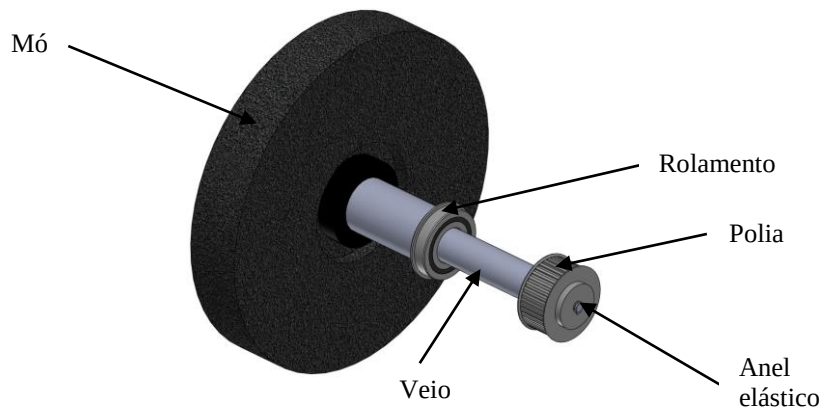
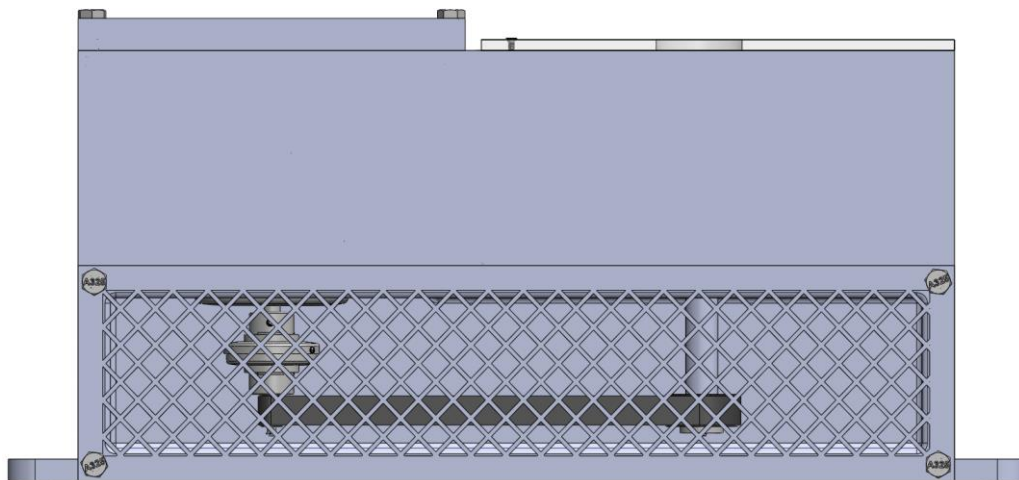


Figura 77- Veio da mó montado

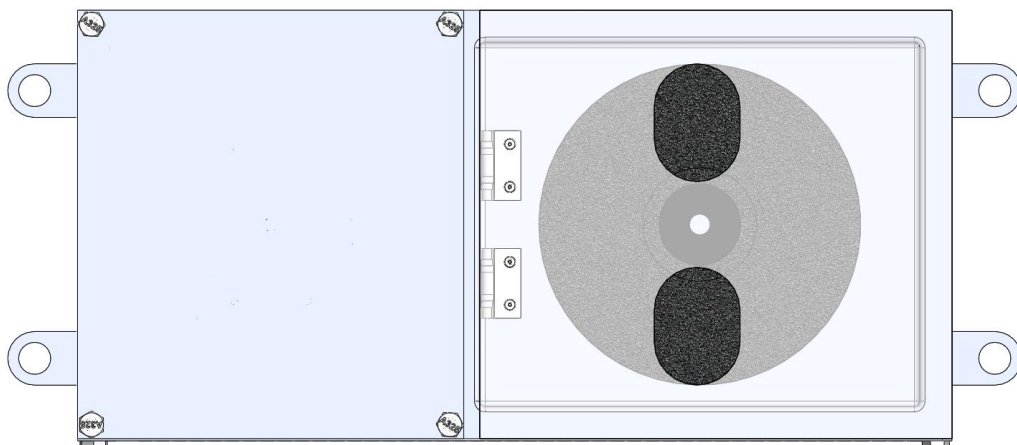
É de notar que a mó é fixa por uma peça roscada ao veio, que vem com a própria mó.

Na Figura 78 mostra-se a máquina de corte projetada. É de notar que apenas é evidenciada a parte que trata da rotação da mó. É ainda necessário projetar o braço que recolhe as lâminas e as coloca no local de afiamento, no entanto isso trata-se de um projeto de automação.

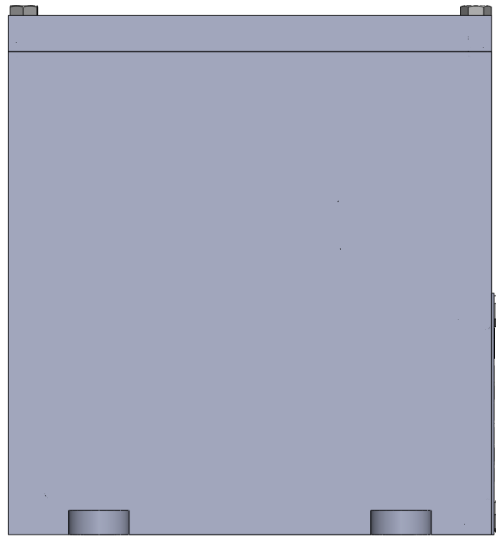
a)



b)



c)



d)

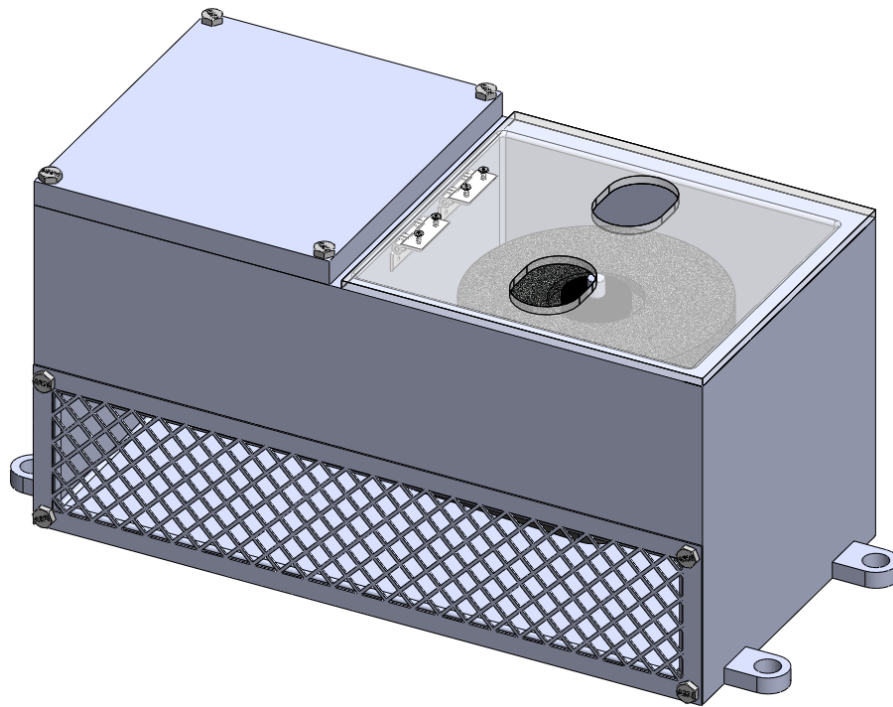


Figura 78- Máquina de afiamento: a) Vista frontal; b) Vista superior; c) Vista Lateral; d) Vista isométrica

5 Análise e discussão de resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos em todos os estudos/testes realizados.

5.1 Análise ao composto de borracha

Utilizando o procedimento descrito no Capítulo 3.2, fez-se uma análise preliminar ao composto de borracha de dois pneus, retirando rebarba de um pneu de inverno e de um pneu de verão. As amostras foram devidamente preparadas pelo CEMUP (corte com ferramenta afiada e revestimento condutor) e na Figura 79 pode-se observar o resultado dessa análise.

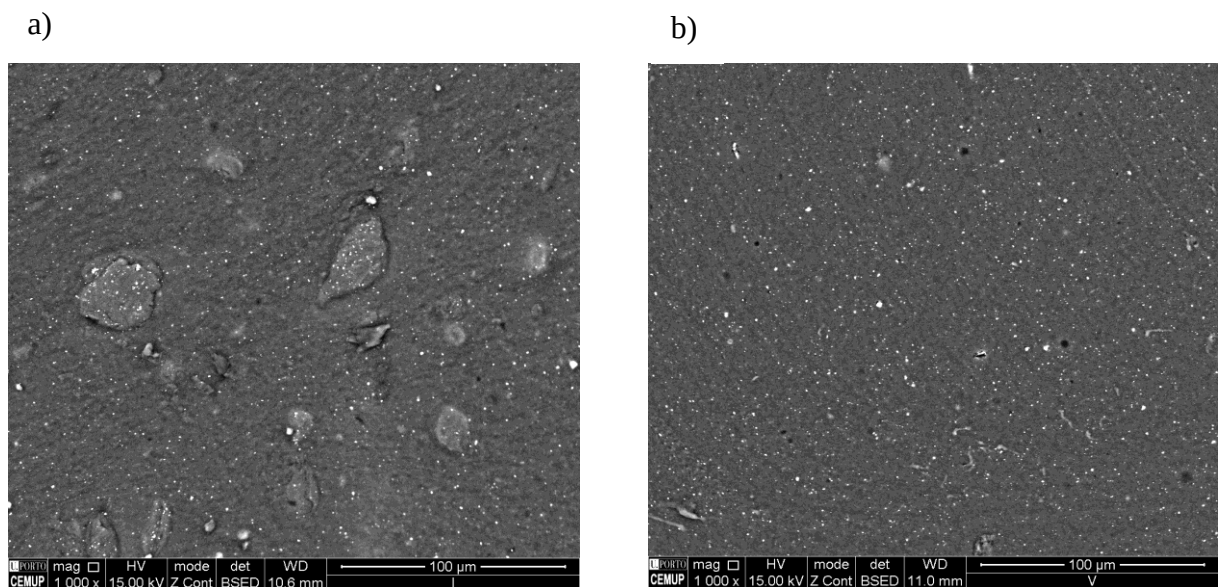


Figura 79- Imagens de amostras de rebarba por SEM (Ampliação: 1000x; Energia do feixe de elétrons: 15000 kV): a) Pneu de Inverno; b) Pneu de Verão

Nestas imagens é possível observar alguns pontos brancos nas amostras. Tratam-se de partículas de silício que estão mais presentes no pneu de verão que no pneu de inverno. Estas partículas podem explicar o desgaste que os pneus causam à ferramenta de corte. O silício é um material bastante abrasivo e em contacto com a ferramenta de corte causa o desgaste elevado.

Com este conhecimento seria interessante, no âmbito desta dissertação, perceber a quantidade dos componentes químicos que as amostras continham. No entanto, esta análise não era oportuna no período da dissertação, servindo apenas de explicação para o desgaste das ferramentas de corte atuais.

5.2 Análise de dureza ao carboneto de tungstênio

Como se falou no Capítulo 3.3, analisou-se a dureza do carboneto de tungstênio da nova ferramenta de corte.

Na Tabela 23 observa-se o valor de dureza determinado comparado com a dureza da ferramenta de corte atual (Tabela 12).

Tabela 23- Valor de dureza do carboneto de tungstênio comparado com a ferramenta de corte atual

Amostra	Dureza (média - HV)
Carboneto de tungstênio (K10)	1752
Ferramenta de corte atual	724

Com isto, deteta-se um valor superior em 100 HV de dureza medida no carboneto em relação aos valores tabelados na Tabela 7. A dureza do carboneto é, aproximadamente, 2,5 vezes superior aos valores de dureza da ferramenta de corte atual. Conclui-se que a dureza é um dos fatores que torna o carboneto de tungstênio um melhor material cortante que o aço utilizado atualmente.

Novamente, seria interessante, no âmbito desta dissertação, analisar a microestrutura do carboneto de tungstênio para perceber os valores do tamanho de grão e percentagem do ligante cobalto, e testar diferentes tipos de carboneto de tungstênio com diferentes percentagens de cobalto. Sabendo que a uma maior percentagem de cobalto está associada uma maior dureza e menor ductilidade, seria importante estudar a percentagem ótima de cobalto para a aplicação neste tipo de ferramenta. Uma vez que maior dureza significa maior resistência ao desgaste verifica-se assim que se estima uma maior durabilidade da aresta de corte para esta nova ferramenta.

Por fim, para terminar a análise experimental, realizaram-se testes com a nova solução construtiva em carboneto de tungstênio, como se observa de seguida.

5.3 Teste em ambiente real

Com o objetivo de entender a melhoria da nova solução para a ferramenta de corte, realizaram-se testes de durabilidade como foi explicado no Capítulo 3.4.

Na Tabela 24 são apresentados os resultados dos testes realizados. Estes testes vêm em função do número de pneus cortados por faca.

Tabela 24- Resultados dos testes em ambiente real

Teste	Nº de pneus cortados
1	620
2	465

Apesar dos testes realizados, estes não traduzem a verdadeira durabilidade do material. Devido à dificuldade de adaptação dos operadores e excesso de esforço na tarefa, os testes terminavam antes da ferramenta de corte perder totalmente o poder de corte. Entre todos os operadores utilizados nos testes, a opinião era de que a ferramenta ainda era capaz de cortar, no entanto a sua geometria não era a ideal o que fazia com que o demasiado esforço para cortar a rebarba os fizesse desistir de testar a nova ferramenta e voltar a utilizar a atual. No caso do Teste 2, este problema evidenciou-se mais, pois o número alcançado foi baixo e inferior ao teste anterior. Isto foi devido ao maior cansaço dos operadores e falta destes para continuar o teste.

Com este problema, pediu-se uma previsão, à Frezite, do número de pneus que esta nova ferramenta seria capaz de cortar. O valor cedido foi de 1000 pneus, sendo que teria a possibilidade de ser afiada 10 vezes. Na Figura 80 são mostradas as ferramentas utilizadas em cada teste. A diferença na ferramenta é no chanfro realizado à volta da lâmina, reduzido a área de contacto com o pneu, e o desgaste da zona assinalada.

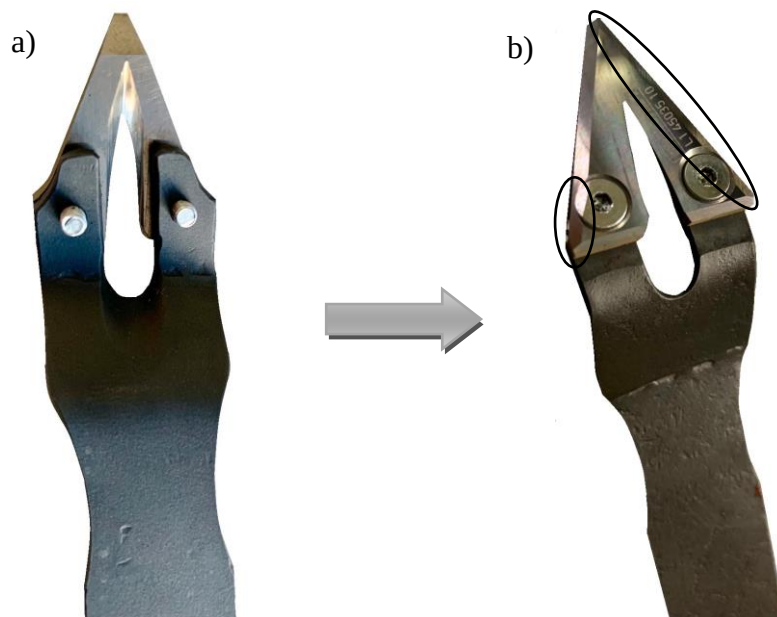


Figura 80- Ferramentas de corte utilizadas no teste em ambiente real: a) Teste 1; b) Teste 2

Para verificar as previsões, foi pedida uma nova ferramenta de corte com a geometria corrigida. Como já foi referido, esta ferramenta não foi produzida no período desta dissertação, dando-se assim por terminado os testes em ambiente real.

6 Viabilidade económica da solução

Todo o estudo, análise e testes se resume ao estudo da viabilidade económica da nova ferramenta de corte. Neste capítulo vai-se entender se a alteração trouxe alguma poupança económica que é o principal objetivo do desenvolvimento e otimização da ferramenta de corte.

Neste estudo de viabilidade económica utilizou-se:

- Dados de produção e custos fornecidos pela engenharia industrial da empresa;
- Dados obtidos nos testes de ambiente real;
- Previsões e cotações fornecidos pela empresa produtora da ferramenta de corte.

Na Tabela 25 mostram-se os dados fornecidos quanto aos custos associados à utilização da ferramenta de corte atual e da nova ferramenta de corte. Os dados da ferramenta de corte atual foram fornecidos pela Continental, segundo o estudo da engenharia industrial. Os dados da nova ferramenta de corte foram fornecidos pela Frezite.

Tabela 25- Custos associados às ferramentas de corte

Custos Gerais	Atual	Nova
Aquisição	5.00 €	45.00 €
Afiamento	1.20 €	35.00 €
Esmeril	19.79 €	-

Descreve-se como custo de aquisição o custo da compra da ferramenta e o custo de afiamento como o custo de afiar a ferramenta, que no caso da ferramenta atual tem associado o custo do esmeril. É de salientar que estes valores estão representados para um ciclo de vida da ferramenta, ou seja, para o número total de afiamentos que a ferramenta é capaz de efetuar. Segundo dados fornecidos, a ferramenta atual é afiada, em média, 8 vezes e a nova ferramenta é capaz de ser afiada 10 vezes. O custo do esmeril descreve-se como o custo da compra da pedra do esmeril. Também é de salientar que estes valores da nova ferramenta não estão amortizados para valores comerciais. É natural que com a venda em massa destas ferramentas, este valor desça, quer na sua aquisição, quer no afiamento.

Utilizando estes custos, com os dados de produção fornecidos pela Continental e com os dados dos testes em ambiente real, foi possível calcular o preço de uma faca por pneu.

Sabe-se que uma ferramenta atual é capaz de cortar em média 693 pneus e que, como o teste em ambiente real diz, a nova ferramenta corta 620 pneus, sendo que é afiada 10 vezes. Os cálculos encontram-se na Tabela 26.

Tabela 26- Custo das ferramentas de corte por pneu

	Atual	Nova
Aquisição	0.00722 €	0.00660 €
Afiamento	0.00173 €	0.00513 €
Esmeril	0.00023 €	-
Total	0.00918 €	0.01173 €

Com estes valores é possível calcular o custo anual, tal como a poupança prevista. É de notar que a empresa produz 60000 pneus (Capítulo 1.2) durante os 325 dias de produção anuais. Assim, na Tabela 27, verifica-se a viabilidade económica.

Tabela 27- Viabilidade económica da nova ferramenta de corte

	Atual	Nova
Custo da ferramenta/pneu	0.00918 €	0.01173 €
Custo anual	178 913.76623 €	228 739.00293 €
Poupança anual		-49 825.23670 €
Poupança anual (%)		-27.85%

Como se pode observar, segundo os dados do teste, a nova ferramenta de corte iria ter um prejuízo económico de aproximadamente 28%. Deste modo, a nova solução não é uma solução viável.

Apesar destes resultados, como foi visto no Capítulo 5.3, a ferramenta só não foi capaz de cortar mais pneus devido à sua geometria que obrigava os operadores a exercer maior esforço, obrigando a interromper o teste. Segundo estes, a lâmina ainda estava em condições de operar durante mais pneus. Com isto, foi pedida uma previsão, à Frezite, do número de pneu que a nova ferramenta de corte seria capaz de cortar. O número fornecido foi de 1000 pneus até necessitar de ser afiada. Nesta situação, e mantendo os custos gerais iguais, é possível prever a poupança anual que a nova ferramenta consegue alcançar. Na Tabela 28 verifica-se uma previsão da viabilidade económica da nova ferramenta de corte e compara-se com os dados obtidos na dissertação anterior.

Tabela 28- Previsão da viabilidade económica da nova ferramenta de corte com a atual e a dissertação anterior (Correia 2018)

Custo/pneu	Atual	Nova	Vanadis 8	Sleipner
Aquisição	0.00722 €	0.00409 €	0.00434 €	0.00645 €
Afiamento	0.00173 €	0.00318 €	0.00047 €	0.00111 €
Esmeril	0.00023 €	-	0.00006 €	0.00015 €
Total	0.00918 €	0.00727 €	0.00488 €	0.00770 €
Custo anual	178 913.766 €	141 818.181 €	95 176.635 €	150 149.461 €
Poupança anual		37 095.584 €	83 737.131 €	28 764.305 €
Poupança anual (%)		20.73%	46.80%	16.08%

Com isto, verifica-se que, mesmo mantendo o preço total não amortizado da nova ferramenta, consegue-se uma poupança de aproximadamente 21%, com apenas um aumento de cerca de 400 pneus cortados pela ferramenta entre afiamentos. É de notar que o valor elevado de poupança do aço Vanadis 8 é obtido para o preço do aço somado ao preço de mão-de-obra igual ao da faca atual. Na realidade isso não é verdade, sendo que o preço de mão-de-obra será mais elevado devido ao facto do aço Vanadis 8 apenas ser fornecido em chapas de 5 mm e a ferramenta ter uma espessura de 3 mm. Assim, este valor de aquisição da faca aumenta por causa da necessidade de maquinaria da chapa, reduzindo a poupança. O custo do afiamento também se estimou igual à ferramenta atual, no entanto este pode ser mais elevado, pois afiar um aço mais duro requer mais tempo, reduzindo igualmente a poupança.

Fazendo um estudo do aumento da poupança com o aumento do número de pneus que a nova ferramenta corta entre afiamentos, verifica-se que é uma progressão aproximadamente logarítmica, em que a partir de um certo aumento do número de pneus que a ferramenta corta, o aumento da poupança deixa de ser significativo. A Figura 81 ilustra esta progressão. Este estudo foi feito até um aumento de 3 vezes em relação ao resultado obtido no teste em ambiente real. É de salientar que se continuou a não amortizar o custo total da nova ferramenta.

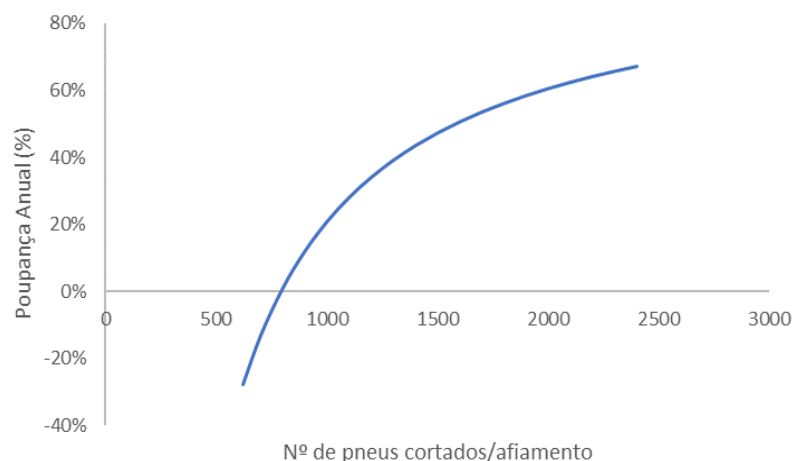


Figura 81- Gráfico da poupança anual em função dos pneus cortados entre afiamentos pela nova ferramenta de corte

Com isto, e com os preços fornecidos pela Frezite, conclui-se que apenas a partir do valor de 793 pneus cortados pela ferramenta entre afiamentos, é que existe poupança.

7 Conclusões e propostas de trabalho futuro

7.1 Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo desenvolver e otimizar uma ferramenta de corte de rebarba na indústria de pneus. Inicialmente o carboneto de tungsténio foi selecionado como material de corte e, assim, seria necessário desenvolver uma solução construtiva para a ferramenta que reduzisse os custos da operação.

A dureza, o tamanho de grão e a composição química mostraram-se influentes no desempenho de corte da ferramenta. Quanto mais duro o material e a presença de carbonetos melhor é o desempenho. Em relação ao tamanho de grão é necessário um balanço, pois quanto maior o tamanho de grão, melhor é a resistência ao desgaste, e quanto menor o tamanho de grão, mais afiada será a zona de corte. Com estes resultados, confirma-se que o carboneto de tungsténio é um bom material para a ferramenta de corte, pois verificou-se que é um material duro (1750 HV) e fabricado por pulverometalurgia, evidenciando um controlo no tamanho de grão, e assim, resistente ao desgaste.

Antes do desenvolvimento da nova ferramenta, analisaram-se amostras de rebarba quanto à sua microestrutura. Verificou-se a presença de partículas compostas essencialmente por silício que são responsáveis pelo desgaste das ferramentas de corte atuais.

Com isto, desenvolveu-se uma nova ferramenta de corte, numa nova solução que implica a junção de um cabo com uma lâmina de carboneto de tungsténio. Deste modo, o custo da ferramenta baixa (em relação à ferramenta integral neste material), pois apenas a lâmina é feita de carboneto de tungsténio. Realizaram-se testes em ambiente real com a nova solução, obtendo-se melhorias significativas em relação à ferramenta atual. A nova ferramenta é capaz de cortar, em apenas um afiamento, aproximadamente o mesmo número de pneus que a ferramenta atual corta num ciclo de vida. No entanto, surgiram problemas quanto à geometria da nova ferramenta. Esta era demasiado larga e obrigava a um maior esforço dos operadores para cortar a rebarba. Assim, os resultados obtidos não correspondem ao limite de pneus que é capaz de cortar, pois os testes terminavam quando o operador não conseguia mais utilizar a ferramenta e não quando esta perdia poder de corte.

Assim, através de uma previsão do número de cortes possíveis, com base nos testes em ambiente real, existe a possibilidade teórica de uma poupança anual de cerca de 21%.

Por fim, projetou-se uma máquina automática de afiamento. Esta é uma etapa que atualmente é manual e tem influência no ciclo de vida da ferramenta. Cada operador afia a sua ferramenta, sendo que o material retirado é arbitrário. Deste modo, uma ferramenta pode realizar uma grande variabilidade de afiamentos. Com a máquina automática, a taxa de material removido é controlada e assim a durabilidade das ferramentas torna-se maior.

7.2 Trabalhos futuros

De forma a dar seguimento ao trabalho realizado nesta dissertação e melhorar o desempenho da ferramenta e consequente poupança, propõe-se a realização de trabalhos futuros.

Deve ser dada continuidade ao estudo da nova ferramenta, procurando iterativamente melhorar a ferramenta até chegar ao produto final. Continuar com os testes em ambiente real e recolher *feedbacks* dos operadores.

Devido ao conceito da nova solução, propõe-se o desenvolvimento e otimização de um cabo ergonómico e de uma solução de fixação entre a lâmina e o cabo. Este trabalho está a ser desenvolvido por dois estudantes do Mestrado em Design Industrial e de Produto da Universidade do Porto.

Aconselha-se a realizar um estudo de viabilidade económica da ferramenta final, com os devidos custos associados.

Com a máquina de afiamento automático projetada, é pertinente avançar para a etapa de produção de um protótipo. É necessário projetar um braço automático que guie as lâminas à zona de afiamento e controle a taxa de material removido.

Referências

- Aços, Ramada. 2016. Catálogo Ramada Aços.
- AG, Continental. 2013. "Tire basics data." accessed 04/10/2018. <https://blobs.continental-tires.com/www8/servlet/blob/85818/d2e4d4663a7c79ca81011ab47715e911/download-tire-basics-data.pdf>.
- Association, International Tungsten Industry. 2005. "History of Tungsten."
- Automóvel, Portal. 2015. "História: Mabor." accessed 03/10/2018. <https://portalautomovel.blogs.sapo.pt/historia-mabor-uma-marca-portuguesa-que-258613>.
- Azami, Aref, Abdolhamid Azizi, and Ali Khoshanjam. 2018. "Nanofinishing of stainless-steel tubes using Rotational Abrasive Finishing (RAF) process." *Journal of Manufacturing Processes* 34:281-291. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.06.027>.
- Bhowmik, Swagata, and Rudra Naik. 2018. "Selection of Abrasive Materials for Manufacturing Grinding Wheels." *Materials Today: Proceedings* 5 (1, Part 3):2860-2864. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.077>.
- Binder, M., F. Klocke, and B. Doeblener. 2017. "Abrasive wear behavior under metal cutting conditions." *Wear* 376-377:165-171. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.065>.
- Blogspot. 2010. "Tipos de elastómeros." accessed 08/10/2018. <https://eelastomeros.blogspot.com/2010/06/tipos-de-elastomeros-origem-natural-e.html>.
- Brookes, K.J.A. 1996. *World Directory and Handbook of Hardmetals and Hard Materials*: International Carbide Data.
- Caetano, M. 2014. "Formulação de Compostos de Borracha." accessed 08/10/2018. <https://ctborracha.com/borracha-sintese-historica/formulacao/>.
- Castro, Paulo Tavares de. 2014. Dimensionamento à fadiga. Porto: FEUP.
- Coatings, PVD. 2010. "The History of PVD coatings." <https://www.pvd-coatings.co.uk/history-pvd-coatings/>.
- Coran, A. Y. 2013. "Chapter 7 - Vulcanization." In *The Science and Technology of Rubber (Fourth Edition)*, edited by James E. Mark, Burak Erman and C. Michael Roland, 337-381. Boston: Academic Press.
- Correia, J. D. 2018. "Desenvolvimento e otimização de uma ferramenta de corte de rebarba na indústria de pneus." Dissertação MIEM, Universidade do Porto.

- Davim, J.P. 2008. *Princípios da maquinagem*: PUBLINDUSTRIA.
- Davis, J.R., American Society for Metals, ASM International. Handbook Committee, and ASM International. 1989. *Machining*: ASM International.
- Department, Zoeller Engineering. Silicon Carbide vs Tungsten Carbide. edited by Zoeller.
- DCPStart.
- Durit. 2017. Propriedades do metal duro. edited by Durit.
- Eckert, Sandro, and Frank Vollertsen. 2018. "Mechanisms and processing limits of surface finish using laser-thermochemical polishing." *CIRP Annals* 67 (1):201-204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.098>.
- Eisen, W.B. 1998. *ASM Handbook, Volume 7: Powder Metal Technologies and Applications*: A S M International.
- Ferraresi, Dino. 1986. *Usinagem Dos Metais: Fundamentos Da Usinagem Dos Metais*: Edgard Blucher.
- Ferreira, J. M. G. C. 2002. *Tecnologia da Pulverometalurgia*: Fundação Calouste Gulbenkian: Serviço de Educação e Bolsas Lisboa.
- Ferreira, Luís Andrade. 2016. "Cálculo de Veios." In *Iniciação ao Projeto*. FEUP.
- García, José, Verónica Collado Ciprés, Andreas Blomqvist, and Bartek Kaplan. 2019. "Cemented carbide microstructures: a review." *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 80:40-68. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.12.004>.
- Group, Arvind Mafatlal. 2010. "Vulcanização e aceleradores." accessed 11/10/2018. <http://www.nocil.com/Downloadfile/DTEchnicalNote-Vulcanization-Dec10.pdf>.
- Gu, K. K., Q. Lin, W. J. Wang, H. Y. Wang, J. Guo, Q. Y. Liu, and M. H. Zhu. 2015. "Analysis on the effects of rotational speed of grinding stone on removal behavior of rail material." *Wear* 342-343:52-59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.08.008>.
- Hamed, G. R. 2012. "Materials and Compounds." In *Engineering with Rubber*, edited by Alan N. Gent, 11-36. Hanser.
- Hashimoto, Fukuo, Stephen P. Johnson, and Rahul G. Chaudhari. 2016. "Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process." *CIRP Annals* 65 (1):325-328. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.011>.
- Heisler, Heinz. 2002. "8 - Tyres." In *Advanced Vehicle Technology (Second Edition)*, edited by Heinz Heisler, 270-310. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Hock, R. 2010. *The Perfect Edge: The ultimate guide to sharpening for woodworkers*: Popular Woodworking Books.
- Industries, Taber. "Abrasion and wear testing." <http://www.abrasiontesting.com/understanding-wear-abrasion/types-wear/>.
- Industries, Taber. 2018. "Tipos de desgaste." accessed 16/10/2018. <http://www.abrasiontesting.com/understanding-wear-abrasion/types-wear/>.

Jain, N. K., and S. Pathak. 2017. "3.23 Electrochemical Processing and Surface Finish." In *Comprehensive Materials Finishing*, edited by M. S. J. Hashmi, 358-380. Oxford: Elsevier.

Lawson, Richard. 2003. "Selecting the right abrasives for your operation." accessed 08/01/19. <https://www.thefabricator.com/article/cuttingweldprep/selecting-the-right-abrasives-for-your-operation>.

Li, Wenhui, Xiuhong Li, Shengqiang Yang, and Weidong Li. 2018. "A newly developed media for magnetic abrasive finishing process: Material removal behavior and finishing performance." *Journal of Materials Processing Technology* 260:20-29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.05.007>.

Ltd, RS Components. Motor Technical Data. TECO.

Materials, Sandvik Hard. 2009. "Sandvik Hard Materials." <http://www.hardmaterials.sandvik.com/>.

Mattox, Donald M. 2010. "Chapter 7 - Physical Sputtering and Sputter Deposition (Sputtering)." In *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition)*, edited by Donald M. Mattox, 237-286. Boston: William Andrew Publishing.

McMaster-Carr. 2013. Torque Limiting Flexible Shaft Coupling.

Mesnac. 2018. "Produtos para prensas." accessed 12/10/2018. <http://en.mesnac.com/product-die.aspx>.

Moore, Martin A. 1978. "Abrasive wear." *International Journal of Materials in Engineering Applications* 1 (2):97-111. doi: [https://doi.org/10.1016/S0141-5530\(78\)90054-7](https://doi.org/10.1016/S0141-5530(78)90054-7).

Morais, J. M. S. 2012. *Desenho Técnico Básico - 3*. Edited by 23ª Edição: Porto Editora.

Negócios, Jornal de. 2018. "Reestruturação na Continental." accessed 04/10/2018. <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/automovel/detalhe/alema-continental-estara-a-equacionar-reestruturacao-profunda>.

Ozturk, Onur, and Chengbin Chu. 2018. "Exact and metaheuristic algorithms to minimize the total tardiness of cutting tool sharpening operations." *Expert Systems with Applications* 95:224-235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.11.030>.

Paskvale, S. 2007. "Properties of PVD hard coatings." Faculty of Mathematics and Physics, University of Ljubljana.

RACE. 2018. "Continental Mabor." <https://www.race.com.pt/fr/projets/avac/continental-mabor-copy>.

Rodgers, Brendan, and Walter Waddell. 2013a. "Chapter 9 - The Science of Rubber Compounding." In *The Science and Technology of Rubber (Fourth Edition)*, edited by James E. Mark, Burak Erman and C. Michael Roland, 417-471. Boston: Academic Press.

Rodgers, Brendan, and Walter Waddell. 2013b. "Chapter 14 - Tire Engineering." In *The Science and Technology of Rubber (Fourth Edition)*, edited by James E. Mark, Burak Erman and C. Michael Roland, 653-695. Boston: Academic Press.

- Rowe, W. Brian. 2014. "3 - Grinding Wheel Developments." In *Principles of Modern Grinding Technology (Second Edition)*, edited by W. Brian Rowe, 35-62. Oxford: William Andrew Publishing.
- Sandvik. 2012. Understanding cemented carbide.
- Sandvik, Coromant. 1994. *Modern metal cutting: a practical handbook*. Sandviken, Sweden: Sandvik Coromant.
- Sarkar, A. D. 1976a. "CHAPTER 8 - ADHESIVE WEAR." In *Wear of Metals*, edited by A. D. Sarkar, 49-58. Pergamon.
- Sarkar, A. D. 1976b. "CHAPTER 11 - ABRASIVE WEAR." In *Wear of Metals*, edited by A. D. Sarkar, 69-73. Pergamon.
- Sato, Yoshiko, Junki Kawamura, Takashi Nagase, S. A. Pahlovy, and Iwao Miyamoto. 2011. "Sharpening of CVD diamond coated tools by 0.5–10keV Ar⁺ ion beam." *Diamond and Related Materials* 20 (7):954-959. doi: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.04.008>.
- Silva, L., Alves, F.J., Marques, A. T. 2013. *Materiais de Construção*. Porto: Publindústria.
- SKF. 2015. Rolamentos de esferas.
- Soares, J. P. 1992. *Aços: características e tratamentos*. Edited by 5ª Edição: Livraria Livroluz.
- MD Solids 4.0.0.
- Sommer, John G. 2009. "Elastomers and Compounds." In *Engineered Rubber Products*, edited by John G. Sommer, 15-24. Hanser.
- System, Continental Business. 2014. Manual PDC. edited by Continental. Lousado.
- Trent, Edward M., and Paul K. Wright. 2000. "Chapter 7 - Cutting tool materials II: Cemented carbides." In *Metal Cutting (Fourth Edition)*, edited by Edward M. Trent and Paul K. Wright, 175-226. Woburn: Butterworth-Heinemann.
- Upadhyaya, G. S. 2001. "Materials science of cemented carbides — an overview." *Materials & Design* 22 (6):483-489. doi: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00007-3).
- Upadhyaya, Gopal S. 1998. "3 - Production of Metal and Carbide Powders." In *Cemented Tungsten Carbides*, edited by Gopal S. Upadhyaya, 55-88. Westwood, NJ: William Andrew Publishing.
- Valerini, D., M. A. Signore, L. Tapfer, E. Piscopiello, U. Galietti, and A. Rizzo. 2013. "Adhesion and wear of ZrN films sputtered on tungsten carbide substrates." *Thin Solid Films* 538:42-47. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.10.116>.
- Vicente, Antenor. 2016. "Mecanismos de desgaste de metais." <http://mundomecanico.com.br/mecanismos-de-desgaste-dos-metais/>.
- Yuan, Xiaoyun, Liqing Chen, Yang Zhao, Hongshuang Di, and Fuxian Zhu. 2014. "Dependence of Grain Size on Mechanical Properties and Microstructures of High Manganese Austenitic Steel." *Procedia Engineering* 81:143-148. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.141>.

ANEXO A: Desenho técnico das ferramentas de corte

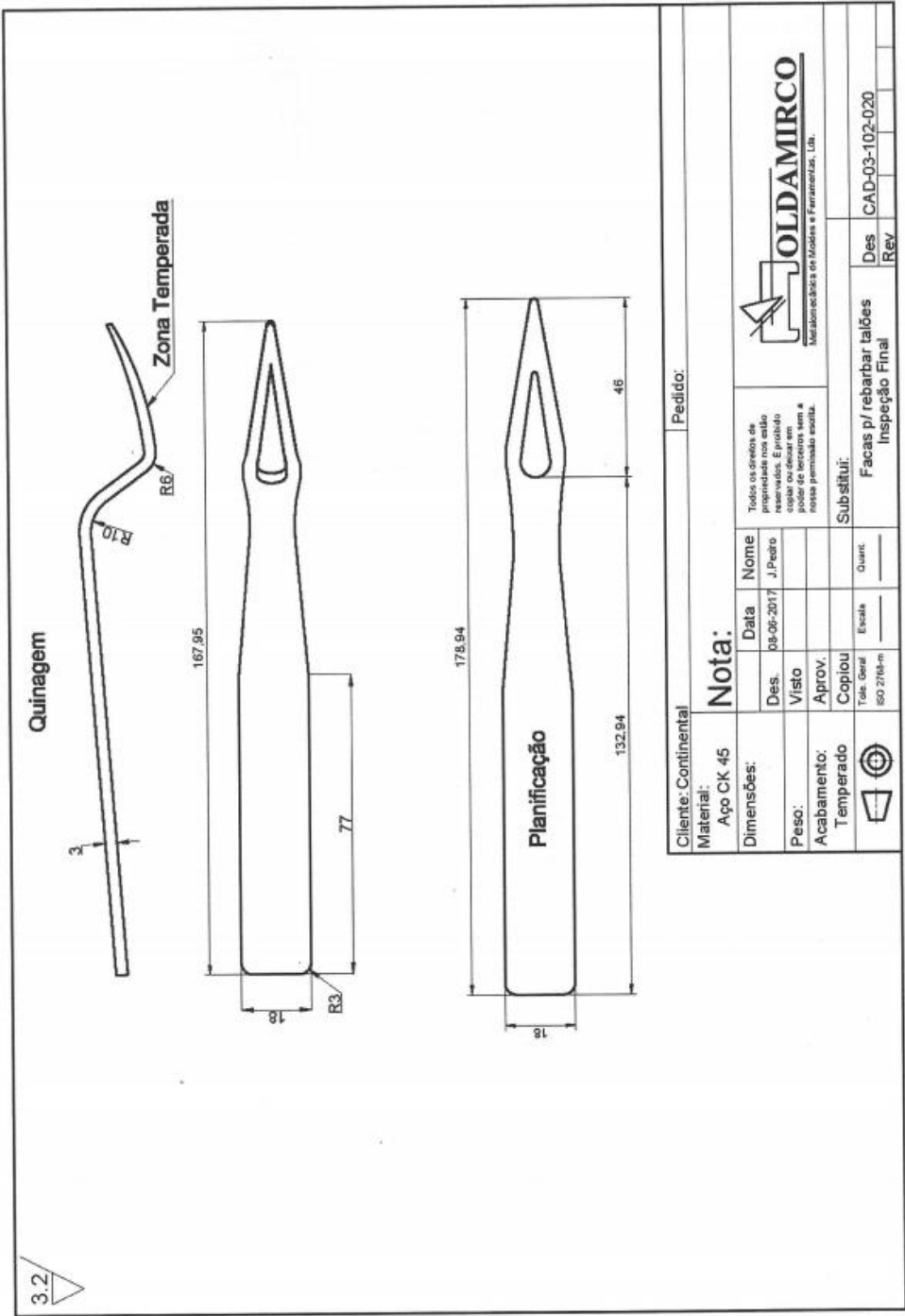


Figura 82- Desenho Técnico da ferramenta de corte atual

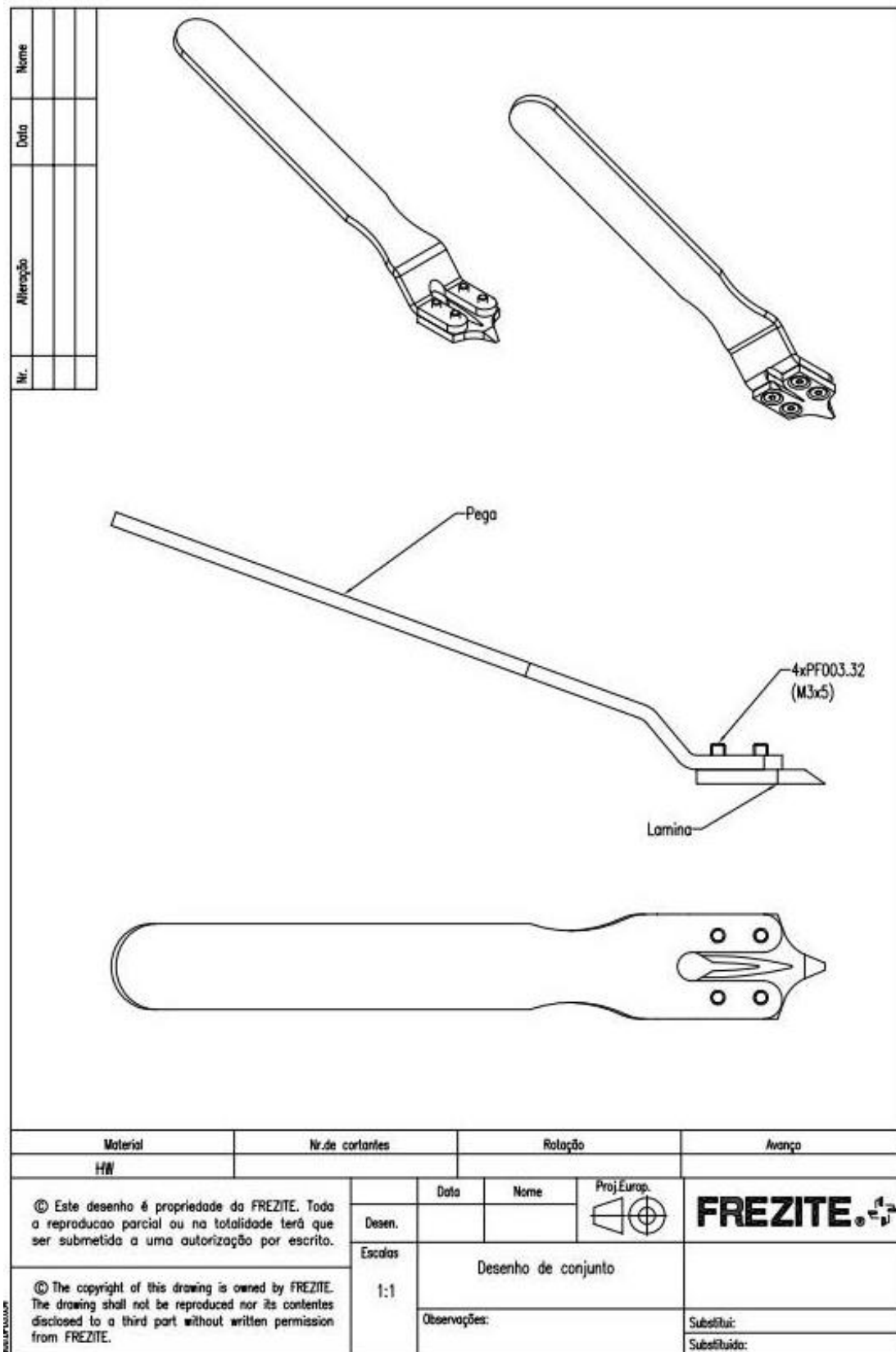


Figura 83- Primeiro protótipo desenvolvido pela Frezite

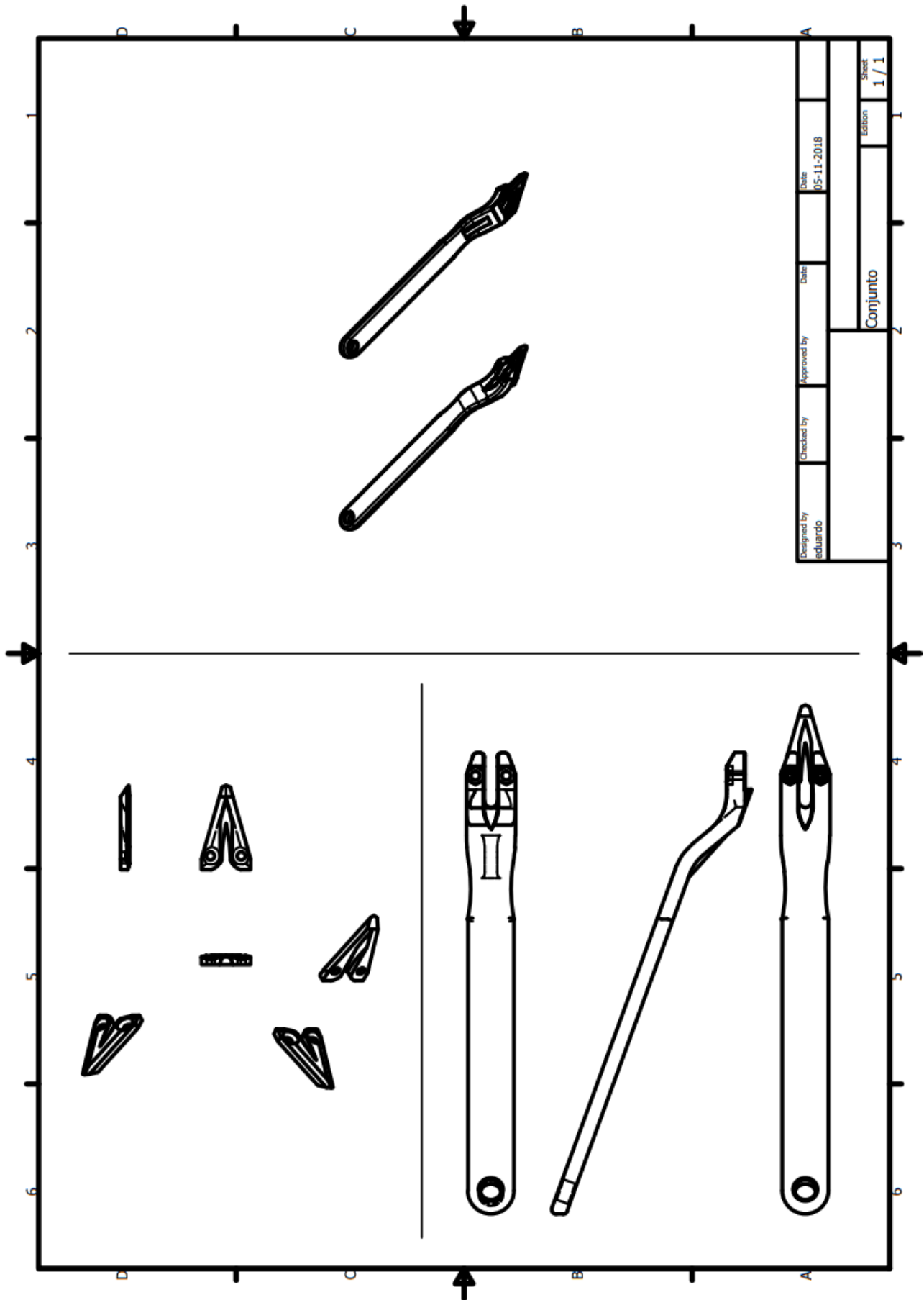


Figura 84- Desenho técnico do protótipo mais recente

ANEXO B: Desenho técnico e dados técnicos dos componentes da máquina de afiamento



TECHNICAL DATA SHEET

RATING AND BASIC DATA						
Motor Type	ALTA					
Type	Cage Rotor					
Material	Aluminium					
Output Power (kW)	0.25					
Power Supply Freq (Hz) (+/- 2%)	50					
No. of Poles	2					
Industry Standard	IEC 60034					
Efficiency Banding	IE3					
Enclosure	TEFC, IC411, IP55					
Mounting	IM3001, B5					
CONSTRUCTION						
Frame Size	63M					
Bearing Type DE / NDE	6201ZZC3					6201ZZC3
Lubrication	Grease					
Grease Type	Multitemp SRL					
Insulation Class	F					
Temperature rise by Resistance at S.F.1	B					
Vibration level	Grade A (IEC 60034-14)					
Estimated weight (kgs)	6					
SITE CONDITION						
Ambient temperature (deg C)	-15 min / 40 max					
Maximum Altitude (metre)	1000					
Area Classification	Safe					
Rating	Continuous S1					
Service factor	1.00					
Starting method	DOL					
PERFORMANCE DATA						
Full Load Speed (rpm)	2785					
Power Supply Voltage (V) (+/- 10%)	220	230	240	380	400	415
Full Load Current (FLC, A)	1.3	1.2	1.2	0.8	0.7	0.7
Efficiency – 4/4 load (%)	69.9			69.9		
Efficiency – 3/4 load (%)	66.5			66.5		
Efficiency – 1/2 load (%)	58.2			58.2		
Efficiency – 1/4 load (%)	40.5			40.5		
Power Factor – 4/4 load (%)	72.0			72.0		
Power Factor – 3/4 load (%)	60.0			60.0		
Power Factor – 1/2 load (%)	46.0			46.0		
Power Factor – 1/4 load (%)	33.0			33.0		
Starting Current (%FLC) +20% IEC Tolerance	500			500		
Full Load Torque (Nm)	1			1		
Starting Torque (%FLT)	200			200		
Breakdown Torque (% FLT)	280			280		
ACCESSORIES						
Winding thermistors 3 pcs, 1 per phase	Included					
PAINTING						
Specification	TECO Standard					
Finish Colour	RAL 7032					
Country of Origin						
Country of Origin	China					

All data is calculated and subject to confirmation in the event of an order.

All data is subject to IEC 60034 Tolerances.

Figura 85- Tabela técnica do motor ALTA - 0063 M1 - 10002- IZ (Ltd)

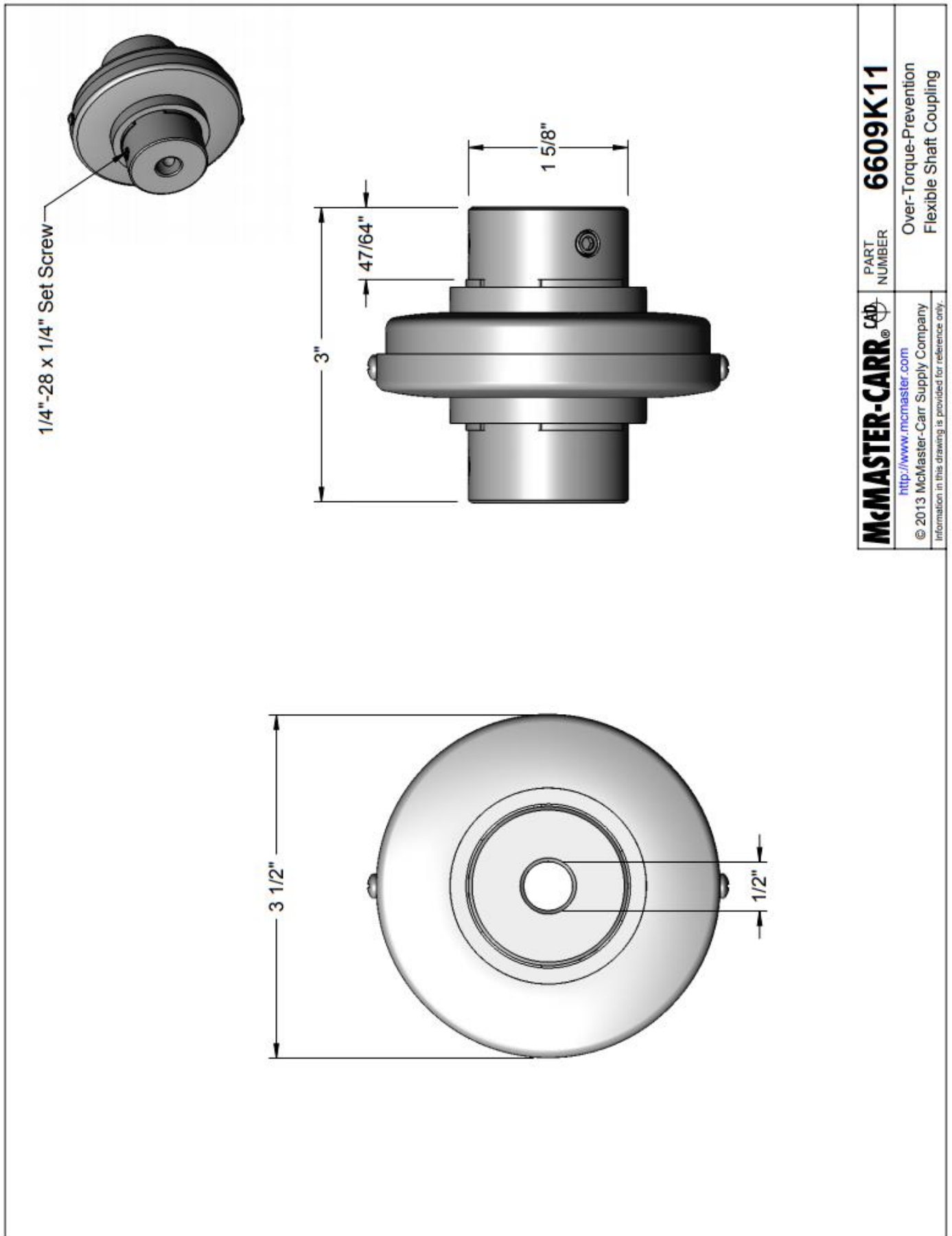
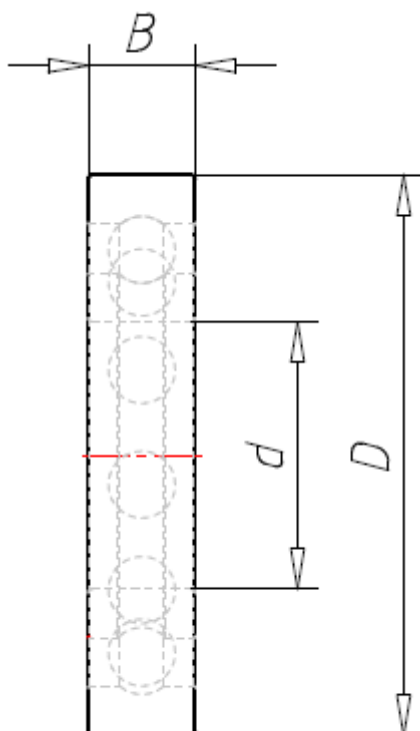


Figura 86- Desenho técnico da embraiagem (McMaster-Carr 2013)



Technical Data

Designation	61812
d - Bore diameter[mm]	60
D - Outside diameter[mm]	78
B - Width[mm]	10
C - Width including wave seal[mm]	0
d1 - Shoulder diameter inner ring[mm]	65.4
d2 - Recess diameter inner ring shoulder[mm]	0
D1 - Shoulder diameter outer ring/ inner diameter housing washer[mm]	72.9
D2 - Recess diameter outer ring shoulder[mm]	74.56
D3 - Outside diameter flange[mm]	0
D4 - Outside diameter snap ring[mm]	0
h - Locating slot depth outer ring[mm]	
b - Locating slot width outer ring[mm]	0
r1,2 min. - Chamfer dimension outer ring[mm]	0.3
C - Basic dynamic load rating[kN]	11.4
C0 - Basic static load rating[kN]	11
Pu - Fatigue load limit[kN]	0.465
Reference speed[r/min]	17000
Limiting speed[r/min]	11000
kr - Calculation factor	0.015
f0 - Calculation factor	16.9
Mass bearing[kg]	0.11
Snap ring	

Figura 87- Dados técnicos do rolamento 61812 (SKF 2015)

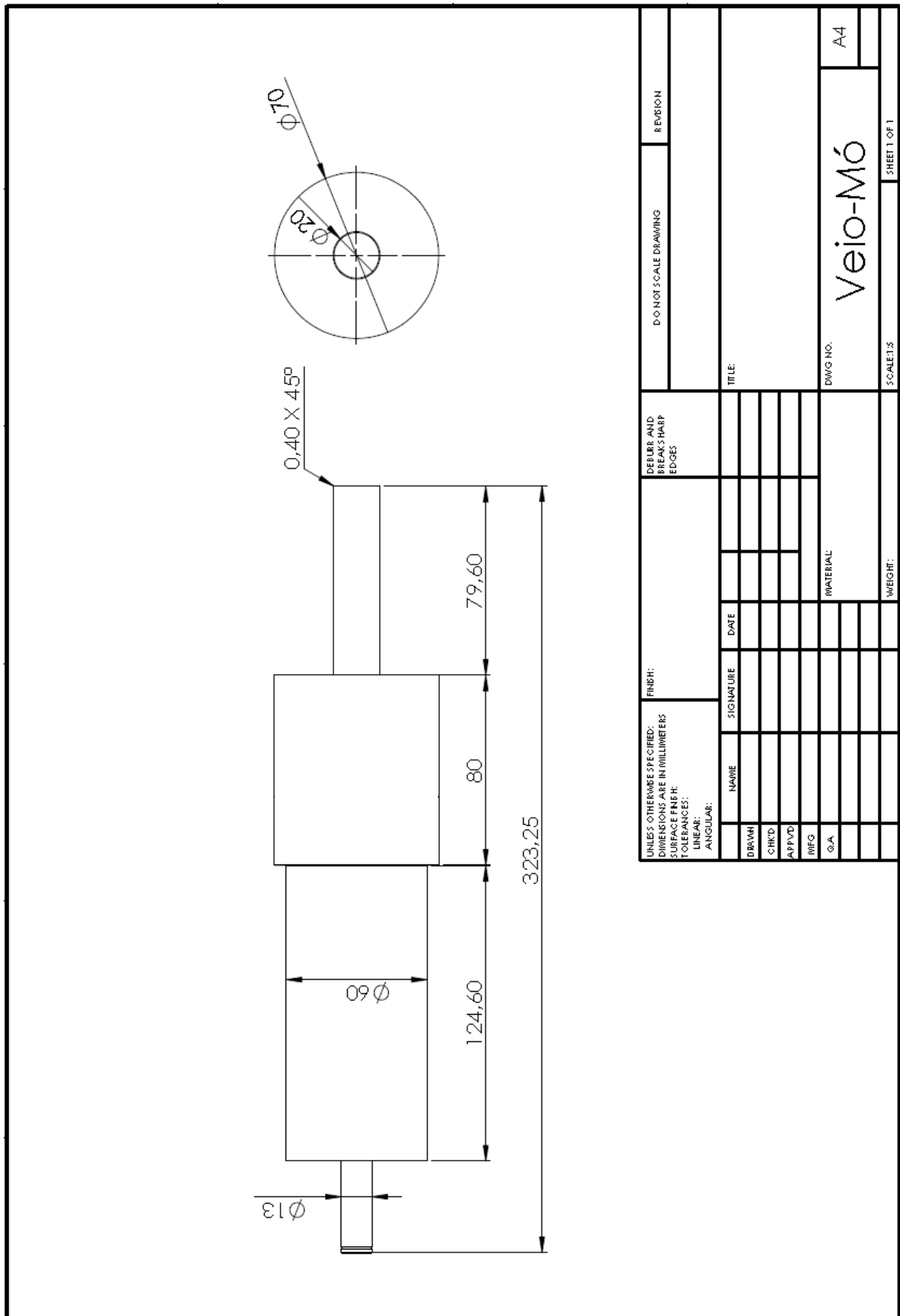


Figura 89- Desenho técnico do veio da mó

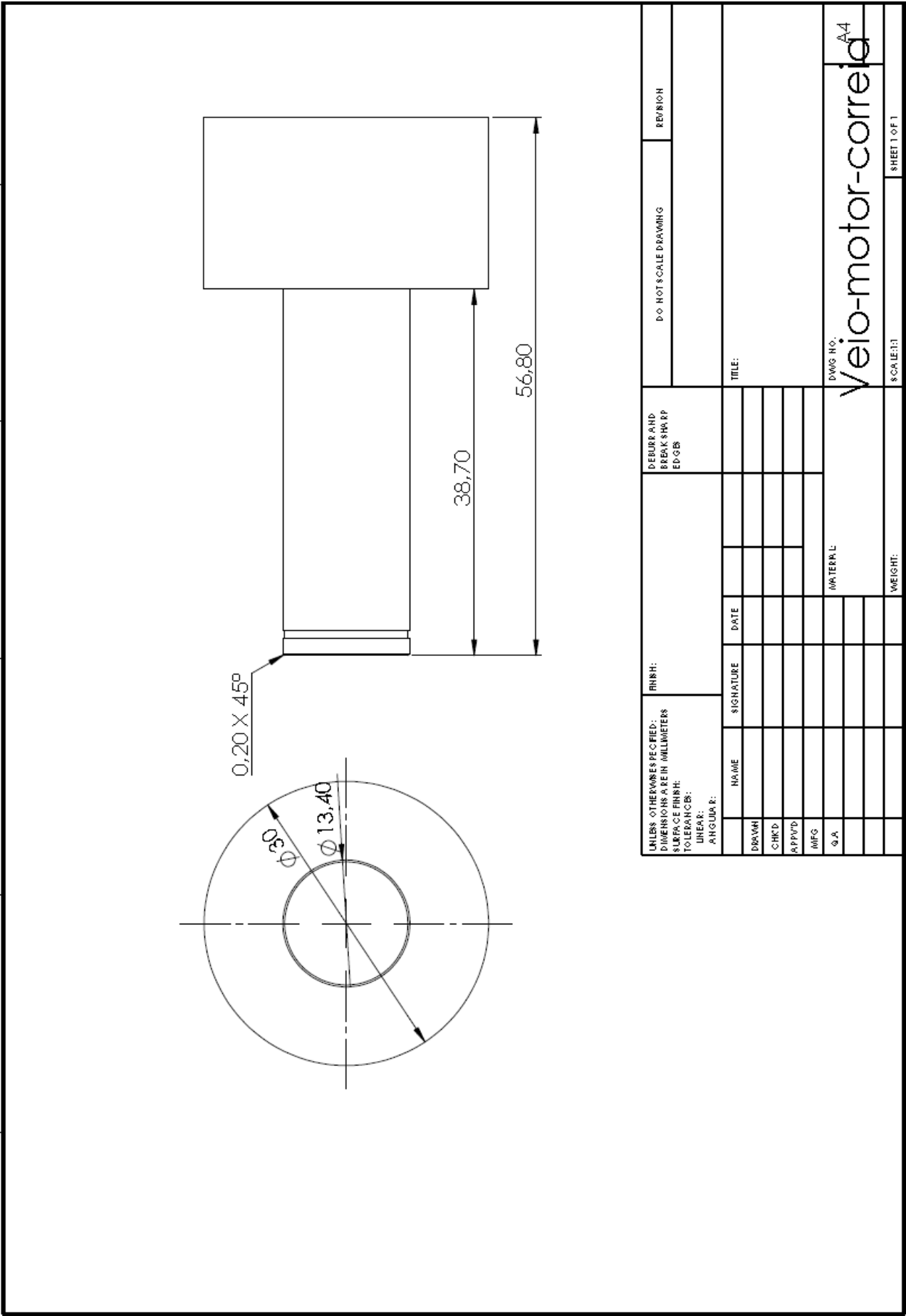


Figura 90- Desenho Técnico do veio do motor

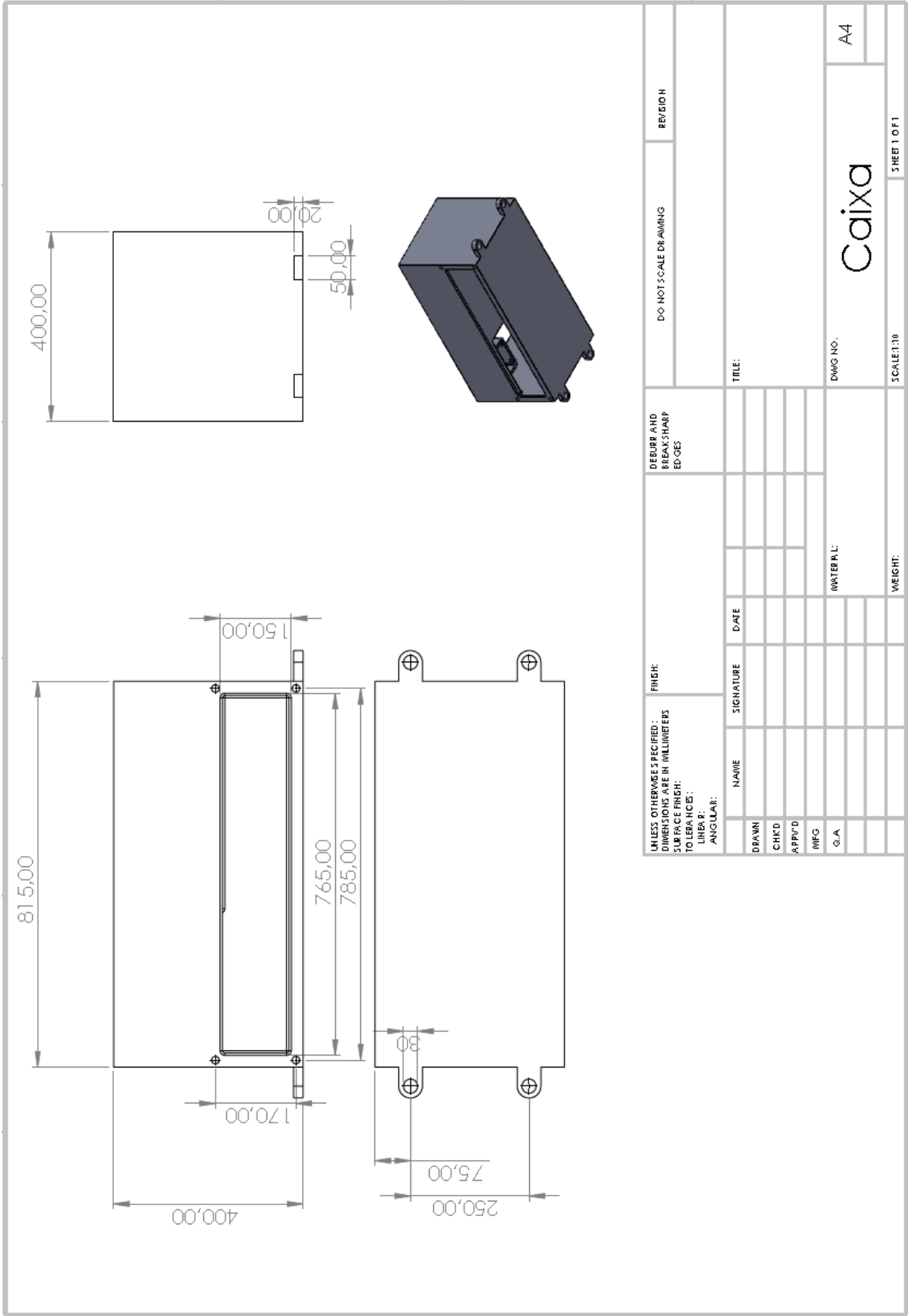


Figura 91- Desenho Técnico da caixa