

Desenvolvimento e otimização de uma ferramenta de corte de rebarba na indústria de pneus

João Duarte de Amorim Correia

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Doutor Jorge Lino

Orientador na Continental Mabor: Eng.º Bruno Sousa



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho 2018

João Duarte de Amorim Correia

E-mail: em11051@fe.up.pt

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

Porto, Portugal

À minha família

Resumo

Na indústria, durante a produção de pneus, é frequente o aparecimento de excesso de borracha associado a anomalias no funcionamento dos moldes aquando da etapa de vulcanização. Devido à crescente exigência dos clientes neste setor, os pneus sofrem um controlo de qualidade rigoroso, durante o qual estes excessos de material são removidos. Uma vez que as ferramentas utilizadas para esta remoção, compostas por um aço de construção, se desgastam rapidamente e apresentam uma solução construtiva pouco ergonómica para os operadores, a Continental Mabor- Indústria de Pneus S.A. propôs a otimização da ferramenta utilizada neste processo de corte de rebarba de borracha, sendo esse o principal objetivo desta dissertação.

Para a realização deste trabalho utilizaram-se distintos tipos de aços. Efetuaram-se análises microestruturais e ensaios de dureza de modo a compreender os resultados obtidos. Foram também realizados ensaios de micro-abrasão por esfera rotativa de modo a tentar prever o comportamento dos materiais em ambiente real. Testaram-se em condições reais, diferentes tipos de aços bem como vários tipos de tratamentos superficiais de forma que fosse possível escolher o mais adequado. Desenvolveu-se, em simultâneo às tarefas anteriores, uma nova solução construtiva para a ferramenta de corte.

Os resultados mais satisfatórios para os ensaios de micro-abrasão por esfera rotativa e para os ensaios em condições reais foram obtidos por tipos de aços distintos. Verificou-se que as diferenças entre as microestruturas dos materiais residem sobretudo na morfologia dos carbonetos presentes na matriz martensítica.

Concluiu-se que a presença de carbonetos melhora a resistência ao desgaste, contudo, para a aplicação pretendida os aços com uma microestrutura composta por uma matriz martensítica com uma rede de carbonetos finos bem distribuídos, são os que apresentam melhores resultados, neste caso um aço para ferramentas obtido por pulverometalurgia, possibilitando, através do uso deste, a redução das despesas associadas ao processo de corte de rebarba. A nova solução construtiva, para além de permitir reduzir drasticamente a quantidade de material desperdiçado, representa também, através do novo cabo ergonómico, uma melhoria para a qualidade de trabalho dos operadores, e ultimamente, uma poupança económica a longo prazo.

Palavras-chave: Corte de borracha; Aço; Desgaste; Carbonetos; Ferramenta de corte.

Development and optimization of the burr cutting tool in the tires industry

Abstract

In the industry, during tire manufacturing, the excess of rubber frequently appears, being associated to anomalies in the mold functioning during the vulcanization stage. Due to the growing demand of clients in this sector, tires have a rigorous quality control, during which these material excesses are removed. Considering that the tools used for this removal, which are composed by a construction steel, quickly wear out and present a constructive solution with little ergonomics for the operators, Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A. has proposed the optimization of the tool used for this rubber burr cutting process, being this the main objective of this dissertation.

For this work accomplishment, distinct types of steel have been used. There have been made microstructural analysis and hardness tests in order to understand the obtained results. There also have been made ball cratering tests in order to try to predict the materials behavior in a real context. Using real conditions, there have been performed some tests in distinct types of steel, as well several types of superficial treatments, so that it would be possible to choose the most fit. It has also been developed, simultaneously to the previous jobs, a new constructive solution to the cutting tool.

The most satisfactory results for the ball cratering tests and the ones in real conditions have been obtained by distinct types of steel. It has been noted that the differences between the materials microstructures are mainly regarding the morphology of the carbides that are present in the martensitic matrix.

It has been concluded that the presence of carbides improves the wear resistance. However, for the pretended application, the steels with a microstructure composed by a martensitic matrix with a network of well-distributed fine carbides are the ones that present the best results. In this case, a steel for tools obtained by powder metallurgy, enabling, through its use, the reductions of the expenses associated to the rubber burr cutting process. The new constructive solution, in addition to drastically reduce the quantity of wasted material, also represents, thanks to its new ergonomic cable, an improvement for the operators' quality of work and, ultimately, an economic saving on long term.

Keywords: Rubber cutting; Steel; Wear; Carbides; Cutting tool.

Agradecimentos

Quero aproveitar este espaço para agradecer a todas as pessoas com quem me cruzei ao longo deste percurso e que quer de maneira direta ou indireta contribuíram para este trabalho.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao professor Jorge Lino, orientador da dissertação na FEUP, por todos os conselhos e disponibilidade demonstrada ao longo deste trabalho, bem como o auxílio prestado na obtenção dos recursos necessários para a realização do mesmo.

Ao engenheiro Bruno Sousa, orientador na Continental, por toda a ajuda disponibilizada, todos os momentos de análise e discussão assim como todas as sugestões dadas.

À empresa Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A. pela oportunidade de realizar esta dissertação. Aos colaboradores da Direção de Inovação, pela maneira com que me receberam e me trataram ao longo deste período. A todos os técnicos e operadores com quem tive a oportunidade de lidar, pela disponibilidade e contributo dado para este trabalho.

À equipa de estudantes do mestrado de Design Industrial e de Produto da UP, pelo trabalho que desenvolveram relativamente à pega ergonómica da ferramenta.

Aos professores António Monteiro Baptista, José Duarte Marafona e Rui Neto pela disponibilidade e discussão de ideias sempre que necessário.

À professora Teresa Duarte, pela boa disposição nas várias breves conversas ao longo deste período.

À Sr^a Emília Soares e Sr^a Armanda Teixeira pela boa disposição e auxílio prestado na análise e preparação de amostras.

Ao Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial-INEGI, por toda a colaboração ao longo deste projeto.

À unidade de tribologia e manutenção industrial – CETRIB, pelos recursos disponibilizados para a realização dos ensaios de desgaste.

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

À Ramada, pela disponibilização de materiais e pela realização de tratamentos térmicos, bem como pelo tratamento superficial de nitruração efetuado.

À Moldamirco, pela disponibilidade e pela produção de várias ferramentas incluindo o protótipo.

À FLUPOL e TEandM, pelos revestimentos feitos nas facas utilizadas nos testes.

À Codeplas, pela análise feita relativamente à nova pega ergonómica da ferramenta de corte.

Aos meus amigos, por todos os momentos de estudo e de descompressão ao longo deste percurso. Por todas as conversas e por todas as palavras de incentivo ao longo desta fase.

À Eduarda, pela paciência, apoio, amor e compreensão demonstrada ao longo destes anos, mostrando-se sempre presente, especialmente quando mais necessitei.

Por fim, quero deixar um agradecimento muito especial à minha família, sobretudo a mais próxima. Aos meus irmãos: Estêvão, Hélio e Marisa, pelo carinho, amizade e pela serenidade transmitida quando tudo parecia tão complicado. Aos meus pais: Agostinho e Rosa, por conseguirem reunir todas as condições necessárias para que percorresse esta etapa, pelo amor e apoio incondicional demonstrado ao longo de toda a minha vida, por toda a compreensão demonstrada em momentos menos bons, por todos os valores e ensinamentos que me transmitiram, sem vocês 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	Motivação.....	1
1.3	Objetivos do projeto	2
1.4	Metodologia.....	2
1.5	Estrutura da dissertação	2
2	Estado de Arte.....	5
2.1	O Pneu	5
2.1.1	Constituição de um pneu	5
2.1.2	Produção de um pneu	6
2.1.3	Processo de formação da rebarba num pneu.....	8
2.1.4	Borracha	12
2.2	Mecanismos de corte da rebarba	16
2.3	Desgaste	18
2.4	Materiais e tratamentos para ferramentas de corte.....	21
2.4.1	Aços.....	21
2.4.1.1	Processo de obtenção do aço	32
2.4.1.2	Têmpera em vácuo	36
2.4.2	Tratamentos para reduzir o desgaste das ferramentas	39
2.4.2.1	Nitruração	39
2.4.3	Revestimentos	40
2.4.3.1	PTFE.....	40
2.4.3.2	PVD	41
2.4.4	Carbonetos Sinterizados.....	42
3	Procedimento experimental	45
3.1	Análise da ferramenta atual	46
3.2	Materiais.....	52
3.3	Procedimentos	55
3.3.1	Ensaio de dureza	55
3.3.2	Análise da microestrutura	56
3.3.3	Ensaio de micro-abrasão por esfera rotativa	58
3.3.4	Ensaaios em ambiente real	60
3.3.4.1	Estudo do comportamento de diferentes materiais.....	60
3.3.4.2	Estudo da influência do afiamento	63
3.3.4.3	Estudo da influência da nitruração e revestimentos superficiais.....	63
4	Análise de resultados.....	65
4.1	Ensaio de dureza	65
4.2	Análise da microestrutura.....	65
4.3	Ensaio de micro-abrasão por esfera rotativa.....	69
4.4	Ensaaios em ambiente real.....	71
4.4.1	Estudo do comportamento de diferentes materiais.....	71
4.4.2	Estudo da influência do afiamento.....	75
4.4.3	Estudo da influência da nitruração e revestimentos superficiais.....	77
5	Análise da viabilidade económica da alteração do material	81
6	Desenvolvimento/Otimização da ferramenta de corte	85
7	Conclusões e propostas de trabalho futuro.	91
7.1	Conclusões	91
7.2	Trabalhos futuros	92
8	Referências	93
	ANEXO A: Curvas TRC e de Revenido dos materiais utilizados.....	97
	ANEXO B: Resultados da microanálise por raios X.....	101
	ANEXO C: Desenho técnico da ferramenta atual.	102

ANEXO D: Desenho técnico do protótipo da ferramenta porta lâminas.	103
ANEXO E: Desenho técnico da lâmina de corte para a ferramenta porta lâminas.	104

Siglas

CCT – *Constant Cooling Temperature* (Arrefecimento de temperatura constante)

CETTRIB – Unidade de tribologia e manutenção industrial

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

PLT – *Passenger and light truck* (Passageiros e “camiões leves”)

PTFE – Politetrafluoretileno

PVD – *Physical Vapour Deposition* (Deposição física de vapor)

Índice de Figuras

Figura 1- Constituição de um pneu (adaptado de [1]).	5
Figura 2- Processo de produção de um pneu (adaptado de [1]).	7
Figura 3- Molde de vulcanização de um pneu (adaptado de [2], [3]).	8
Figura 4- Prensa de vulcanização [2].	9
Figura 5- Zonas de um pneu (adaptado de [5]).	10
Figura 6 - Exemplos dos tipos de rebarba existentes. a) Zona do ombro; b) Zona das saídas de ar; c) Zona de contacto dos segmentos do molde; d) Zona do talão (adaptado de [8]).	10
Figura 7 - Posicionamento da ferramenta de corte para os diferentes tipos de rebarba (adaptado de [9]).	11
Figura 8 – Esquema representativo das formas de manusear a ferramenta [10].	11
Figura 9 - Composição de um pneu (adaptado de [1]).	12
Figura 10- Componentes de um composto de borracha (adaptado de [11], [12]).	12
Figura 11- Pneu arrefecido a temperaturas criogénicas [19].	17
Figura 12- Exemplo de ferramentas desenvolvidas para o corte da rebarba [21].	18
Figura 13 - Mecanismos de desgaste por adesão. a) formação de um fragmento redondo irregular; b) formação de um fragmento em forma de cunha. A numeração representa a ordem cronológica (adaptado de [22]).	19
Figura 14 - Mecanismos de desgaste por abrasão (adaptado de [24]).	20
Figura 15 - - Esquemas de abrasão a) por dois corpos; b) por três corpos (adaptado de [22]).	20
Figura 16 - Efeito dos elementos de liga, a) no teor em carbono do ponto eutectóide. b) Na temperatura de transformação eutectóide (adaptado de [31]).	23
Figura 17 - Influência da quantidade de a) carbono e b) elementos de liga para 1% de carbono no ponto de transformação martensítica (adaptado de [31]).	24
Figura 18 - Variação da dureza em função da percentagem de bainite (adaptado de [34]).	26
Figura 19 - Variação do desgaste em função da dureza (adaptado de [34]).	26
Figura 20 - Peso perdido acumulado (PPA) e coeficiente de fricção (CdF) em função da distância de escorregamento (adaptado de [35]).	27
Figura 21 - Efeito da temperatura de revenido na dureza das amostras (adaptado de [36]).	28
Figura 22 - Variação do volume de desgaste em função da força aplicada e dimensão das partículas abrasivas (adaptado de [36]).	28
Figura 23 - Taxa de desgaste e dureza das amostras em função da quantidade de carbono relativos ao estudo de Y.P. Ji et al. (adaptado de [38]).	30
Figura 24 - Esquema representativo a) da qualidade afiamento de arestas de corte e b) da influência do tamanho das partículas na aresta (adaptado de [40]).	32
Figura 25 - Etapas do processo de pulverometalurgia (adaptado de [32]).	33

Figura 26 - Esquema representativo da microestrutura de um aço obtido convencionalmente e outro por pulverometalurgia (adaptado de [32]).....	36
Figura 27 - Comparação entre os processos de aquecimento tradicional de vácuo e por convecção a alta pressão (adaptado de [46])	37
Figura 28 – Influência da pressão na velocidade de arrefecimento para peças com diferentes secções (adaptado de [44]).....	38
Figura 29 - Influência da quantidade de Co e da dimensão do grão de WC na dureza do carboneto cementado (adaptado de [60]).....	43
Figura 30 - Variação da dureza e da tensão de rotura em função do teor em Co (adaptado de [55]).....	43
Figura 31 - Tenacidade e resistência ao desgaste em função da dureza para pastilhas WC-Co (adaptado de [59]).	43
Figura 32 - Etapas do trabalho experimental realizado.	45
Figura 33 - Aspeto das ferramentas nas distintas etapas de produção.....	47
Figura 34 - Processo de afiamento na produção da ferramenta.....	48
Figura 35 - Zonas das amostras analisadas.....	48
Figura 36 - Amostra NL antes do ataque químico.....	49
Figura 37 - Amostra NL após o ataque químico. Nital 2%	49
Figura 38 - Amostra NC antes do ataque químico	49
Figura 39 - Amostra NC após o ataque químico. Nital 2%.....	49
Figura 40 - Amostra DL antes do ataque químico.....	50
Figura 41 - Amostra DL após o ataque químico. Nital 2%	50
Figura 42 - Amostra DC antes do ataque químico.	50
Figura 43 - Amostra DC após o ataque químico. Nital 2%.....	50
Figura 44 - Diferentes tipos de amostra do aço AISI 440C.....	53
Figura 45 - Tratamentos térmicos de têmpera e revenido efetuados. a) “Vanadis 8”; b) “Sleipner”; c) D2.	54
Figura 46 - Máquina de corte TR60 de Remet.	54
Figura 47 - Durómetro Dia Testor 2 RC presente no laboratório de ensaios tecnológicos do DEMec.....	55
Figura 48 - Equipamento RotoPol -21 da Struers, presente no laboratório de metalografia do DEMec.....	56
Figura 49 - DP-U4 da Struers, presente no laboratório de metalografia do DEMec.	56
Figura 50 - Máquina Prontopress-2 da Struers presente no laboratório de metalografia do DEMec.....	57
Figura 51 - Ensaio de micro-abrasão por esfera rotativa a) Pormenor da deposição de abrasivo; b) Tribómetro TE 66 Micro-Scale Abrasion Tester.	58
Figura 52 - Exemplares das ferramentas produzidas. À esquerda em "Vanadis 8" e à direita em "Sleipner".	61
Figura 53 - Pormenor das marcas para distinção das ferramentas.	61

Figura 54 - Representação da metodologia adotada no estudo do comportamento de distintos materiais.	62
Figura 55 - Representação de dois métodos de afiamento distintos utilizados.	63
Figura 56 - Ferramentas utilizadas no estudo da influência da nitruração e revestimentos superficiais. a) C45E b) Nitrurada c) PTFE d) V+PVD.....	64
Figura 57-Amostra 4116 F, aço AISI 440 C. Picral. Microestrutura composta por carbonetos finos numa matriz martensítica revenida (52 HRC).....	66
Figura 58- Amostra 4116 L, aço AISI 440C. Picral. Microestrutura é constituída por martensite revenida e carbonetos finos (54 HRC).	66
Figura 59 - Amostra 4116 N, aço AISI 440 C (54 HRC) Picral. Microestrutura composta por martensite revenida e carbonetos finos	66
Figura 60 - Aço AISI 1045, Nital 2%. Na microestrutura pode ver-se essencialmente martensite (60 HRC) após uma têmpera em água.....	66
Figura 61 - Aço “Sleipner”, Picral. Microestrutura encontram-se carbonetos possivelmente de crómio, molibdénio e vanádio numa matriz ferrítica (243 HB).....	67
Figura 62 - Aço “Sleipner”. Picral. Microestrutura composta por uma matriz martensítica na qual se encontram carbonetos grosseiros e finos (60 HRC).....	67
Figura 63 - Aço “Vanadis 8”. Nital 2%. Nesta microestrutura observam-se carbonetos finos distribuídos na matriz ferrítica (218 HB).	67
Figura 64 - Aço “Vanadis 8”. Nital 2%. Microestrutura composta por martensite com carbonetos finos e bem distribuídos (63 HRC).....	67
Figura 65- Aço AISI D2). Nital 2%. Microestrutura constituída por carbonetos finos e grosseiros numa matriz martensítica (64HRC).....	68
Figura 66- Volume desgastado em função do número de rotações para todas as amostras até as 1500 rotações.....	69
Figura 67 - Volume desgastado em função da dureza para amostras com presença de carbonetos para 1500 rotações.....	69
Figura 68 - Volume desgastado em função do número de rotações para as amostras C45E, “Sleipner”, “V8” e C265.	70
Figura 69- Resultados obtidos com o colaborador 1 no teste de comparação dos distintos materiais.....	71
Figura 70- Resultados obtidos com o colaborador 2 no teste de comparação dos distintos materiais.....	72
Figura 71 - Fratura visualizada a partir da face superior da faca.	73
Figura 72 - Fratura visualizada a partir da face inferior da faca.....	73
Figura 73 - Número de pneus inspecionados em função do volume desgastado no afiamento. Ferramenta “Sleipner” utilizada pelo colaborador 1.	75
Figura 74 - Número de pneus inspecionados em função do volume desgastado no afiamento. Ferramenta C45E utilizada pelo colaborador 1.	75
Figura 75 - Número de pneus inspecionados em função do volume desgastado no afiamento. Ferramenta em “Vanadis 8” utilizada pelo colaborador 1.....	76
Figura 76 - Número de pneus inspecionados em função do volume desgastado no afiamento. Ferramenta em C45E utilizada pelo colaborador 2.	76

Figura 77 - Número de pneus inspecionados em função do volume desgastado no afiamento. Ferramenta em “Sleipner” utilizada pelo colaborador 2.	76
Figura 78 - Número de pneus inspecionados em função do volume desgastado no afiamento. Ferramenta em “Vanadis 8” utilizada pelo colaborador 2.....	76
Figura 79 - Resultados obtidos com o colaborador 3 no estudo da influência dos tratamentos superficiais.	77
Figura 80 - Resultados obtidos com o colaborador 4 no estudo da influência dos tratamentos superficiais.	78
Figura 81 - Imagem representativa da solução 1.....	86
Figura 82 - Imagem representativa de uma das soluções idealizadas.	87
Figura 83 - Imagem representativa da solução 2.....	87
Figura 84 - Detalhes do ensaio de ângulos para encaixe.	88
Figura 85 - Imagem representativa da lâmina.	89
Figura 86 - Disposição otimizada das lâminas para corte.	89
Figura 87 - Imagem representativa da solução 3.....	89
Figura 88 - Curva CTT para o aço “Sleipner” (adaptado de [61]).	97
Figura 89 - Curva de revenido para o aço “Sleipner” (adaptado de [61]).	97
Figura 90 - Curva CTT para o aço “Vanadis 8” (adaptado de [61]).	98
Figura 91 - Curva de revenido para o aço “Vanadis 8” (adaptado de [61]).	98
Figura 92 - Curva CTT para o aço D2 (adaptado de [65]).	99
Figura 93 - Curva de revenido para o aço D2 para várias temperaturas (adaptado de [61]).	99
Figura 94 - Curva CTT para o aço 440 C (adaptado de [66]).	100
Figura 95 - Curva de revenido para o aço 440 C (adaptado de [66]).	100
Figura 96 - Resultados da microanálise por raios X.....	101
Figura 97 - Desenho técnico da ferramenta atual.	102
Figura 98 - Desenho técnico do protótipo da ferramenta porta lâminas.	103
Figura 99 - Desenho técnico da lâmina de corte para a ferramenta porta lâminas.....	104

Índice de Tabelas

Tabela 1- Classificação dos agentes aceleradores (adaptada de [17]).	15
Tabela 2 - Tipos de mecanismos de desgaste (adaptado de [22]).	18
Tabela 3- Fatores que influenciam as taxas de desgaste a seco [23].	19
Tabela 4- Classificação dos aços para ferramentas, adaptado de [29].	21
Tabela 5- Elementos de liga gamagêneos e alfa gêmeo adaptado de [29].	22
Tabela 6- Dureza de um aço comum e de alguns carbonetos presentes no aço (adaptado de [32]).	23
Tabela 7 - Composição química dos aços utilizados no estudo [34].	25
Tabela 8 - Composição química do aço utilizado no estudo [35].	26
Tabela 9 - Composição química do aço AISI D2 usado no estudo [36].	27
Tabela 10 - Composição química dos aços AISI 52100 e D3 [37].	29
Tabela 11 - Condições dos tratamentos térmicos realizados no estudo (adaptado de [37]).	29
Tabela 12 - Valores de desgaste (g) e de dureza obtidos (HRC) (adaptado de [37]).	29
Tabela 13 - Composição química das amostras utilizadas no estudo de Y.P. Ji et al. [38].	30
Tabela 14 - Matriz observada em cada amostra do estudo de Y.P. Ji et al. (adaptado de [38]).	31
Tabela 15 - Composição química do aço AISI 5140 [39].	31
Tabela 16 - Comparação de quatro métodos de processamento de pós de metal (adaptado de [32]).	35
Tabela 17 - Níveis de vácuo (adaptado de [31]).	36
Tabela 18 - Valores de dureza e tenacidade de alguns carbonetos [58].	42
Tabela 19 - Composição química segundo o fornecedor [61].	46
Tabela 20 - Norma da composição química do aço AISI 1045.	46
Tabela 21 - Resultados da análise da composição química à ferramenta nova (N), desgastada (D) e da visita à empresa (V).	51
Tabela 22 - Durezas (HV e equivalente em HRC) da peça nova (N), desgastada (D) e da visita à empresa (V).	52
Tabela 23 - Designações dos aços utilizados segundo algumas normas [61], [62].	53
Tabela 24 - Composição química dos aços (%) [61], [62].	54
Tabela 25 - Tipo de reagentes utilizados para cada material.	57
Tabela 26 - Condições utilizadas nos ensaios de micro-abrasão por esfera rotativa.	58
Tabela 27 - Acabamentos superficiais, número de rotações e materiais utilizados nos ensaios de micro-abrasão por esfera rotativa.	60
Tabela 28 - Valores de dureza das distintas amostras.	65

Tabela 29 - Valores de dureza para as amostras "Sleipner" e "Vanadis 8" no estado fornecido.....	65
Tabela 30 - Tabela resumo dos testes de materiais.	74
Tabela 31- Número de facas necessárias em média por turno.	74
Tabela 32 - Resumo dos valores do ensaio dos tratamentos superficiais.	79
Tabela 33 - Dimensões de uma chapa para produção de ferramentas de corte.	81
Tabela 34 - Dimensões da fração de chapa necessária para produzir uma ferramenta.....	81
Tabela 35 - Pedido de cotação e massa volúmica dos aços.....	82
Tabela 36 - Estimativa de custo de ferramenta para cada tipo de material.	82
Tabela 37 - Relações entre custo da ferramenta e do número de pneus inspecionados.	83

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto

A presente dissertação, realizada em ambiente empresarial, 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.

A entidade promotora do projeto é a Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A., e o objetivo do mesmo passa pela otimização de uma ferramenta de corte utilizada para cortar a rebarba gerada nos pneus da unidade PLT.

1.2 Motivação

A Continental Mabor surge em dezembro de 1989 e o seu nome provém da junção de duas empresas, uma delas a Mabor – Manufatura Nacional de Borracha que era uma empresa de renome a nível nacional na vertente da manufatura da borracha, e a Continental AG de dimensão mundial. O crescimento desta nova empresa foi muito significativo sendo que em 1990 eram produzidos 5000 pneus por dia enquanto que em 2018 a empresa tem capacidade para produzir em média mais de 58000, sendo uma das fábricas da Continental com melhores índices de produtividade.

Na zona final da produção, todos os pneus são inspecionados, surgindo muitos deles com uma rebarba de borracha que necessita de ser removida para obter um pneu com a qualidade pretendida. Sendo esse um processo que acarreta custos não acrescentando valor ao produto final, pretende-se otimizar a ferramenta de corte, para que estes sejam minimizados.

Além disso, os operadores encarregues desta etapa utilizam as ferramentas diariamente durante o seu turno. Uma melhoria neste utensílio provocaria um aumento na qualidade do seu trabalho, permitindo também a prevenção de possíveis lesões devido ao uso contínuo de uma ferramenta pouco ergonômica.

1.3 Objetivos do projeto

Com este projeto pretende-se:

- Melhorar a ergonomia da ferramenta de corte de rebarba;
- Reduzir os custos associados à operação de corte de rebarba;
- Seleção do melhor material para a região de corte da ferramenta.

1.4 Metodologia

A metodologia utilizada passou pela seleção de diferentes materiais para a ferramenta após uma abordagem teórica sobre o material a cortar – a borracha, tecnologias de corte e materiais para ferramentas de corte.

Após a seleção de diferentes materiais, procedeu-se ao desenvolvimento e fabrico de distintos protótipos, sendo esses testados em ambiente real.

Com os resultados dos testes, foi finalmente elaborada uma análise da viabilidade económica da solução encontrada.

1.5 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

1. Introdução

No presente capítulo é feito o enquadramento do projeto, descrevendo a motivação do mesmo, assim como os seus objetivos.

2. Estado de arte

No segundo capítulo é apresentada a pesquisa efetuada, iniciando com a abordagem à borracha, que é o material sujeito ao corte. De seguida descreve-se a forma como surge a rebarba e métodos para a sua remoção. Por fim, faz-se uma análise de aspetos de ferramentas de corte que estejam relacionados com o desgaste da mesma, desde materiais até tratamentos superficiais posteriores como a nitruração, revestimentos anti-desgaste e revestimentos duros (PVD).

3. Procedimento experimental

No terceiro capítulo encontra-se, para além de uma análise da ferramenta atualmente utilizada, a descrição detalhada dos ensaios realizados, desde condições de teste até materiais e equipamentos utilizados.

4. Análise de resultados

O quarto capítulo apresenta os resultados das diferentes experiências realizadas, assim como a sua análise.

5. Análise da viabilidade económica da alteração do material

No quinto capítulo analisa-se a viabilidade económica da produção de facas num novo material, tendo em conta os resultados obtidos durante a presente dissertação.

6. Desenvolvimento/Otimização da ferramenta

Neste capítulo está descrito o processo iterativo, e as diversas soluções construtivas que surgiram no mesmo, até obter um novo conceito.

7. Conclusões e propostas de trabalho futuro

Por fim, no sexto e último capítulo é feita uma apreciação global do trabalho, apresentando as principais conclusões, bem como a lista de propostas para possíveis trabalhos futuros.

2 Estado de Arte

2.1 O Pneu

2.1.1 Constituição de um pneu

De modo a contextualizar o problema que é analisado na presente dissertação, é importante fazer uma breve abordagem aos componentes e materiais presentes na constituição de um pneu.

O pneu é um componente de grande importância nos veículos automóveis. Este deve garantir uma boa estabilidade direcional, assim como algum amortecimento durante um longo período de serviço. Além disso, este deve resistir a forças resultantes de travagens, acelerações e manobras. Ao longo do tempo, o pneu sofreu várias alterações e melhorias no seu formato, o que fez com que cada vez mais se tornasse um objeto de estrutura complexa. Essa estrutura é dividida em várias partes que podem ser observadas na Figura 1. Nessa figura, para melhor compreensão, encontram-se imagens representativas de alguns componentes, sendo representados em tons de laranja os elementos aos quais se fazem referência. De referir que as partes 1 a 3 compõem o piso/cinta e as partes 4 a 9 compõem a carcaça [1].

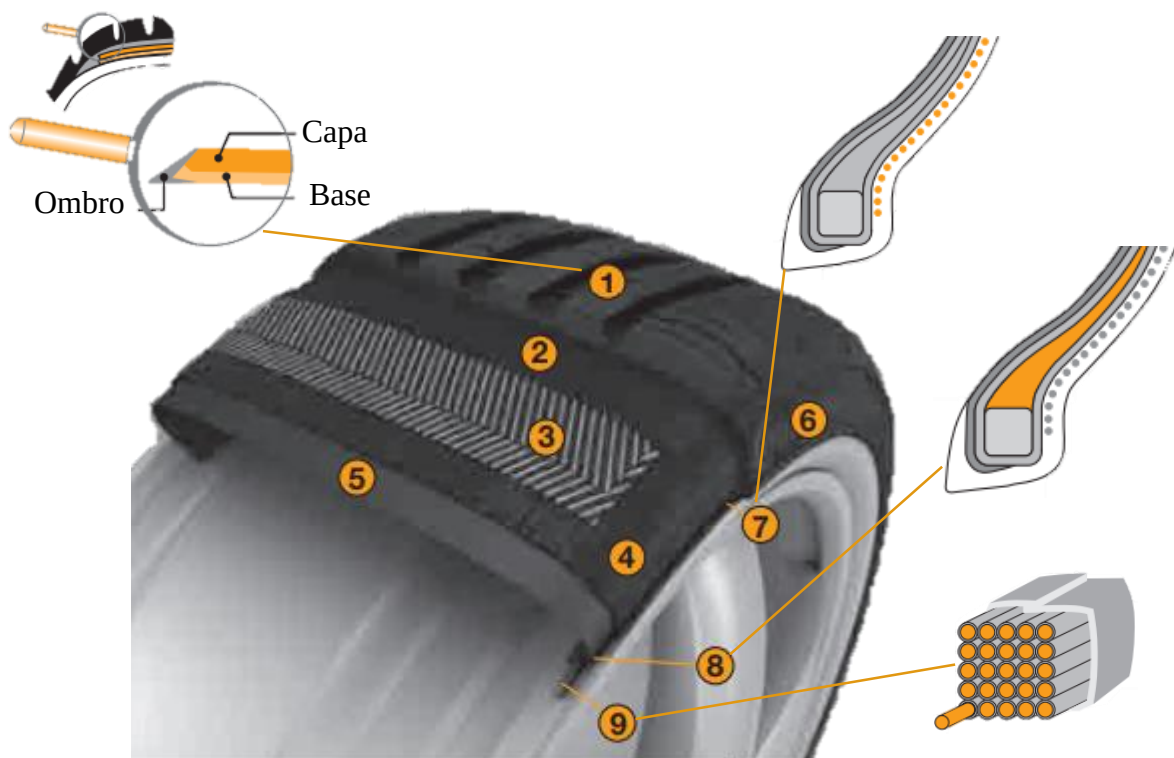


Figura 1- Constituição de um pneu (adaptado de [1]).

Na lista seguinte identifica-se cada um dos componentes e material, assim como uma breve explicação da sua função no pneu [1].

1. **Piso** – Assegura uma alta quilometragem, a expulsão da água e uma boa aderência à estrada. Este é constituído por borracha natural e sintética.
2. **Cap plie** – Permite que o pneu se adeque a altas velocidades. É composto por *Nylon* envolvido em borracha.
3. **Breaker** – Melhora a estabilidade direcional e reduz a resistência provocada enquanto o pneu roda na estrada, além de aumentar a possível quilometragem. É composta por cordas de aço de alta resistência.
4. **Tela** – Controla a pressão interna e assegura a forma dos pneus. É composta por um têxtil (*Rayon* ou poliéster) impregnado em borracha.
5. **Inner Linner** – Torna o pneu impermeável. É composto por borracha de *butyl*.
6. **Parede lateral** – Protege o pneu de danos laterais externos, assim como das condições atmosféricas, sendo composto por borracha natural.
7. **Flipper** - Promove a estabilidade direcional e a precisão na condução do veículo. É composto por aramida e *nylon*.
8. **Cunha** – À semelhança do componente anterior, promove a estabilidade direcional e o conforto durante a condução. É composta por borracha sintética.
9. **Talão** - Permite a ligação à jante de maneira precisa. A sua composição é feita por cabos de aço envolvidos em borracha.

2.1.2 Produção de um pneu

De modo a introduzir o problema desencadeador desta tese o mais cedo possível, optou-se por falar da produção do pneu antes dos materiais que se utilizam para o produzir.

O processo de produção de um pneu é um processo que se pode considerar extenso e complexo, necessitando de diversas etapas e de várias matérias primas (borracha, aço e têxtil), para obter um exemplar. De forma a que este processo possa ser compreendido mais facilmente, encontra-se na página seguinte um esquema representativo (Figura 2). Neste diagrama podem-se observar as distintas etapas, desde a aquisição de matérias primas e misturação, até ao processo de construção, vulcanização e controlo de qualidade. De referir que para esta dissertação existe especial interesse em dois processos: A vulcanização, pois é nesta que surge a rebarba do pneu (temática abordada em 2.1.3.), e o processo de inspeção visual presente na etapa de controlo de qualidade, uma vez que é aí que se procede à remoção da rebarba, usando a ferramenta na qual se foca este projeto.

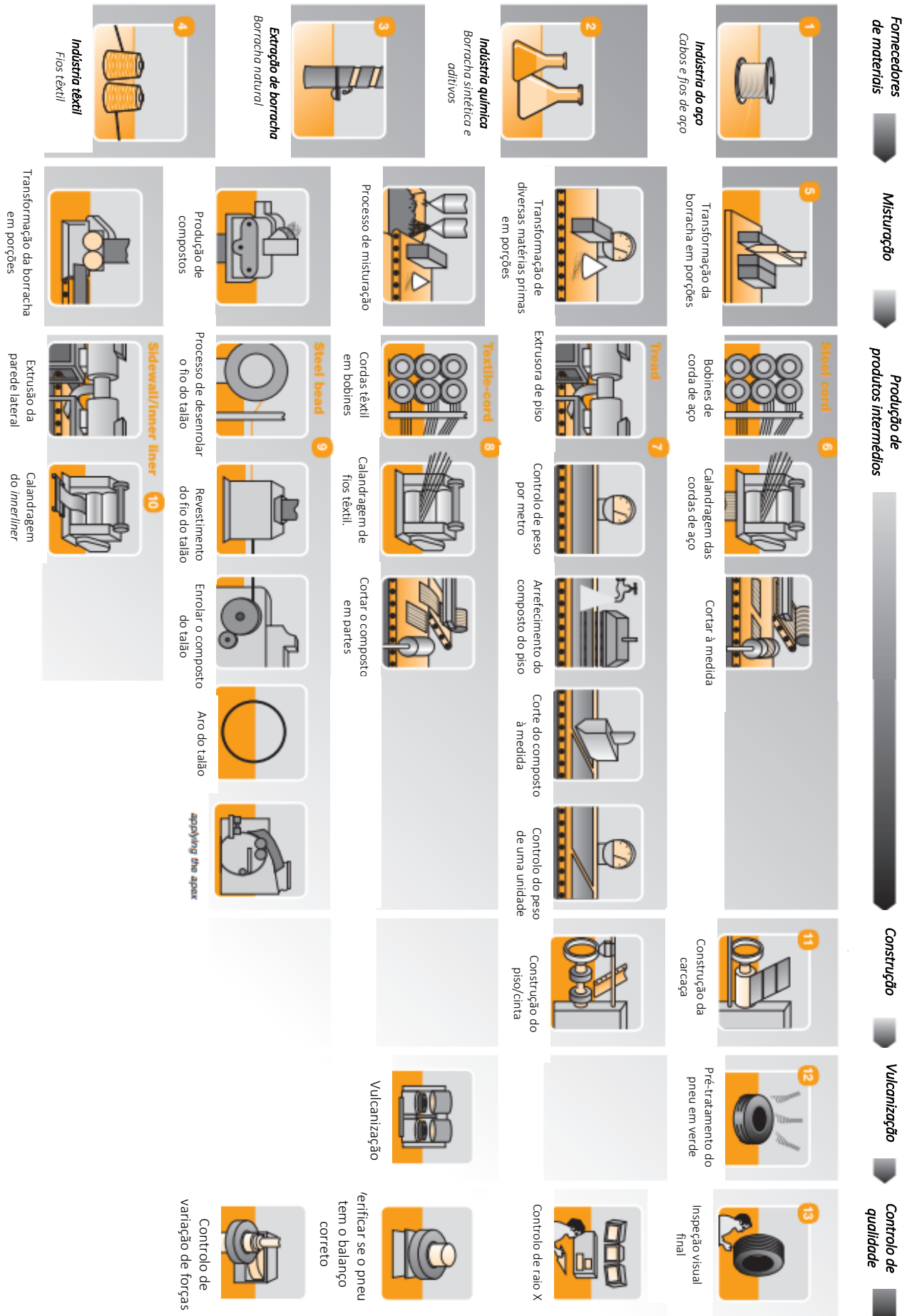


Figura 2- Processo de produção de um pneu (adaptado de [1]).

2.1.3 Processo de formação da rebarba num pneu

Após a construção do pneu em verde (designação antes da vulcanização) inicia-se a etapa de vulcanização, onde surge a rebarba do pneu. Nesta fase, ocorrem duas ações distintas bastante importante: conferir a forma final ao pneu e melhorar as propriedades mecânicas para que o pneu possa ser utilizado.

Numa primeira fase, é aproveitada a grande plasticidade que o pneu em verde apresenta para lhe conferir o formato final. Para isso, este é colocado dentro de um molde de vulcanização (Figura 3) que está acoplado a uma prensa de vulcanização (Figura 4). Neste mecanismo está presente um diafragma que surge pelo interior do molde, como se observa na Figura 3, e que é insuflado com um fluido quente com duas finalidades:

- Pressionar o pneu em verde contra o molde, conferindo-lhe a sua forma e aspeto final;
- Aumentar a temperatura com o intuito de promover a vulcanização.

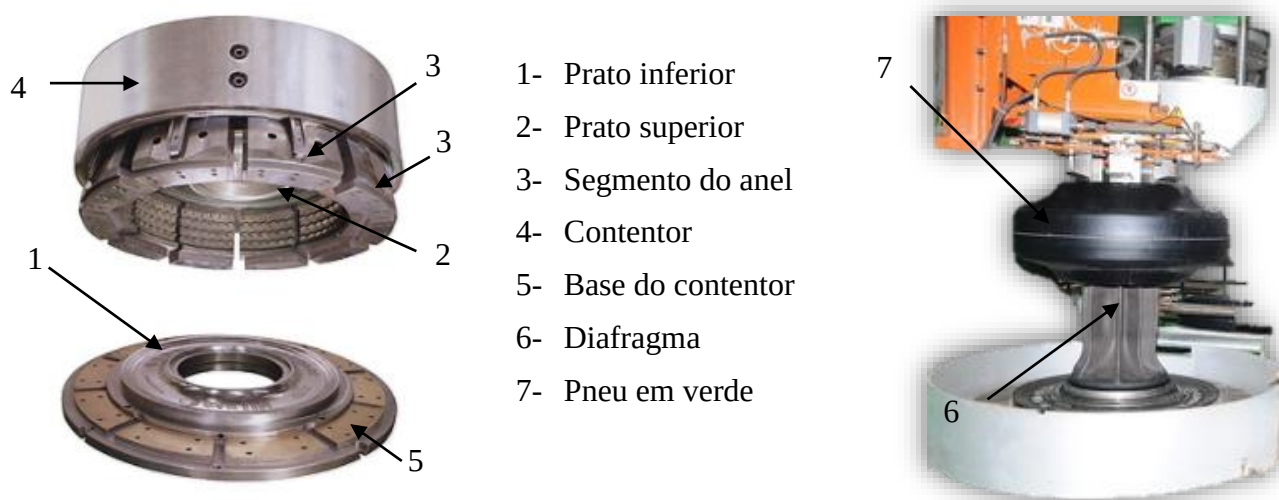


Figura 3- Molde de vulcanização de um pneu (adaptado de [2], [3])

Em simultâneo, aproveitando as condições de pressão e temperatura favoráveis (165-175 °C e 12-16 bar), inicia-se a operação de vulcanização propriamente dita. Trata-se de um processo geralmente aplicado a borrachas e seus derivados, que os torna materiais mais resistentes devido à formação de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas da matriz de borracha por ação de determinados agentes de vulcanização. Isto leva a alterações nas suas propriedades, como por exemplo [4]:

- Aumento da resistência à abrasão;

- Aumento da resistência à tração;
- Redução da solubilidade em solventes orgânicos;
- Aumento da elasticidade.

Os pneus utilizados em viaturas de passageiros e “camiões leves” são produzidos em maiores quantidades e, de forma geral, os respectivos moldes de vulcanização são constituídos por pratos inferior e superior que dão forma às zonas laterais do pneu e por um anel segmentado, geralmente em 9 a 11 partes, que dá a forma ao piso.

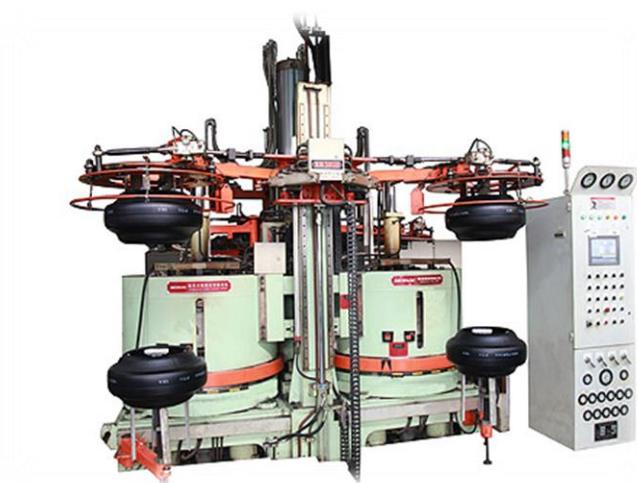


Figura 4- Prensa de vulcanização [2].

A rebarba surge nas linhas de separação das diferentes partes do molde por efeito da pressão existente no processo de vulcanização, podendo ser contínua a todo o comprimento, ou descontínua. As principais causas do seu aparecimento são:

- Desgaste do contentor, nomeadamente nas guias lineares que promovem a abertura/fecho dos segmentos do piso;
- Má preparação do molde;

Além disso, os moldes possuem um sistema de orifícios que tem como função libertar o ar presente dentro dos mesmos, de modo a que este não fique aprisionado e evitando assim possíveis imperfeições no pneu. Apesar de existirem sistemas que permitem a saída de ar, mas não da borracha enquanto ocorre um ciclo de vulcanização, estes podem bloquear, levando a que nos ciclos posteriores exista um excesso de material com o formato desses mesmos orifícios.

Em suma, existem quatro zonas do pneu onde surge a rebarba/excesso de material representadas na Figura 5.

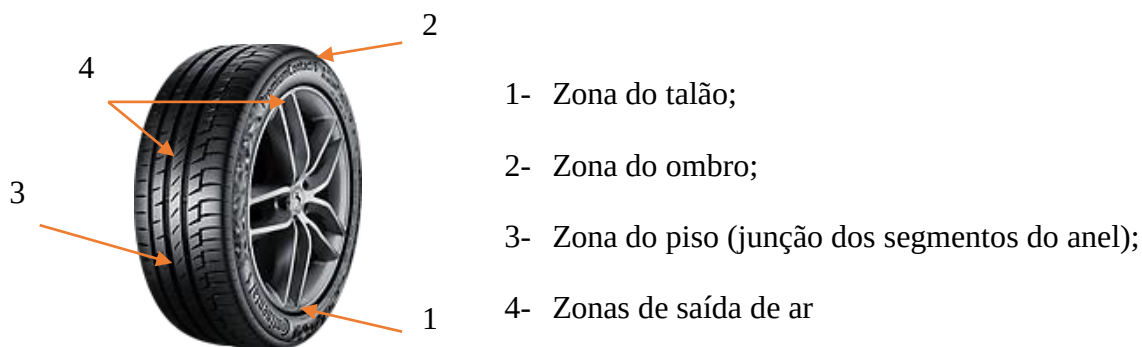


Figura 5- Zonas de um pneu (adaptado de [5]).

Apesar de se referir na literatura [6], [7] a criação de diversos moldes de vulcanização com o objetivo de eliminar/reduzir a rebarba gerada no pneu após a vulcanização, esta acaba por surgir de forma comum. Essa rebarba, apesar de não afetar o desempenho do pneu, faz com que este tenha um aspeto desagradável, recorrendo-se, portanto, a uma operação extra com a finalidade de a remover. Essa operação extra, não acrescenta valor ao pneu e acarreta custos, que se ambicionam minimizar. Na Figura 6 observam-se exemplos dos vários tipos de rebarba existentes.

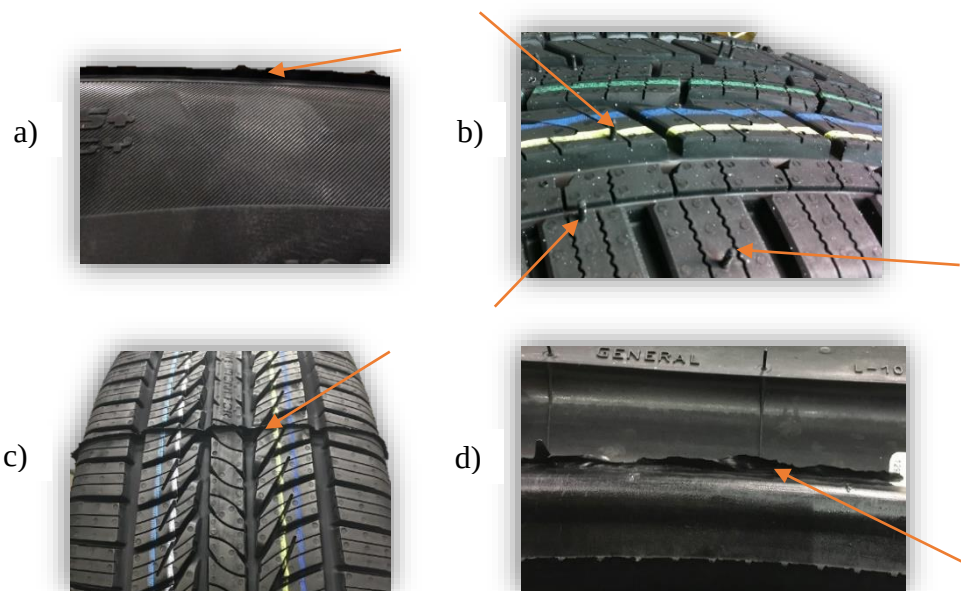


Figura 6 - Exemplos dos tipos de rebarba existentes. a) Zona do ombro; b) Zona das saídas de ar; c) Zona de contacto dos segmentos do molde; d) Zona do talão (adaptado de [8]).

A remoção é efetuada utilizando a ferramenta em estudo, posicionando-a consoante o tipo de rebarba. Na Figura 7 observa-se o posicionamento para o corte de rebarba do ombro (a)), rebarba do talão (b)) e das zonas de saída de ar (c)).



Figura 7 - Posicionamento da ferramenta de corte para os diferentes tipos de rebarba (adaptado de [9]).

Os colaboradores manuseiam a ferramenta de diversas formas, estando várias delas representadas na Figura 8. Verifica-se que na forma c), o colaborador utiliza as duas mãos, o que reduz a força necessária numa mão, possibilitando uma maior precisão.

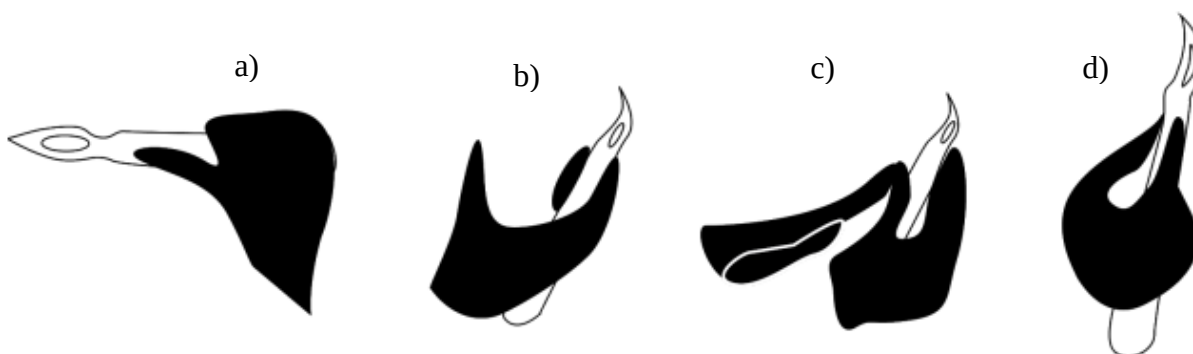


Figura 8 – Esquema representativo das formas de manusear a ferramenta [10].

2.1.4 Borracha

Como material base de um pneu e, conseqüentemente, da rebarba originada, é fundamental caracterizar a borracha relativamente à sua constituição e propriedades.

Para além dos materiais de reforço (aço e têxtil), este é constituído na sua maioria (cerca de 85%) por vários materiais e compostos, como se pode observar na Figura 9.

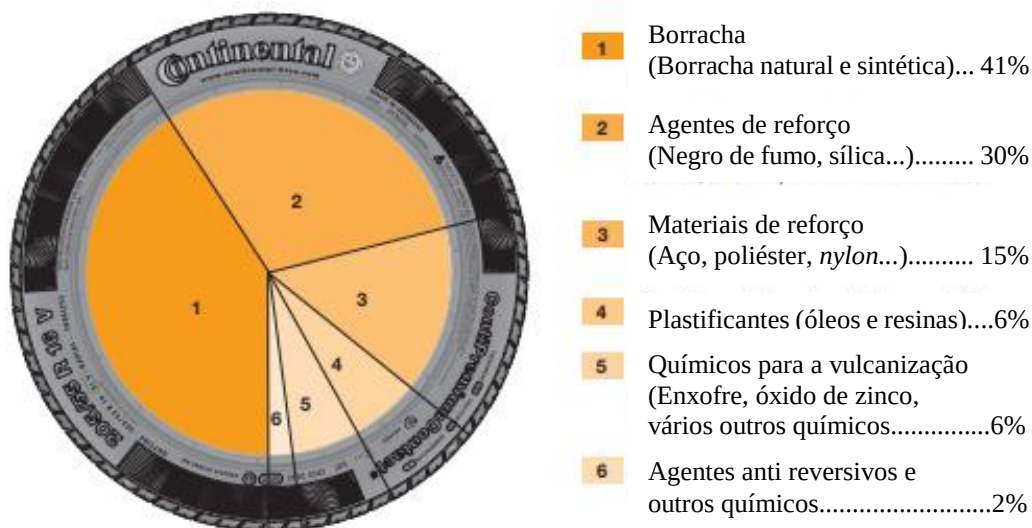


Figura 9 - Composição de um pneu (adaptado de [1]).

As borrachas, classificadas como elastómeros, são compostos poliméricos dotados de uma grande viscoelasticidade. Estas podem ser classificadas como saturadas e insaturadas, consoante a possibilidade de serem vulcanizadas, ou não, por adição de substâncias [11].

Misturar diversos materiais com o intuito de obter compostos de borracha com propriedades específicas para um determinado fim é uma ciência complexa e exige um vasto conhecimento a nível químico. Os materiais usados para criar um composto de borracha podem ser divididos em cinco categorias diferentes, como se pode ver no esquema representado na Figura 10 [12].

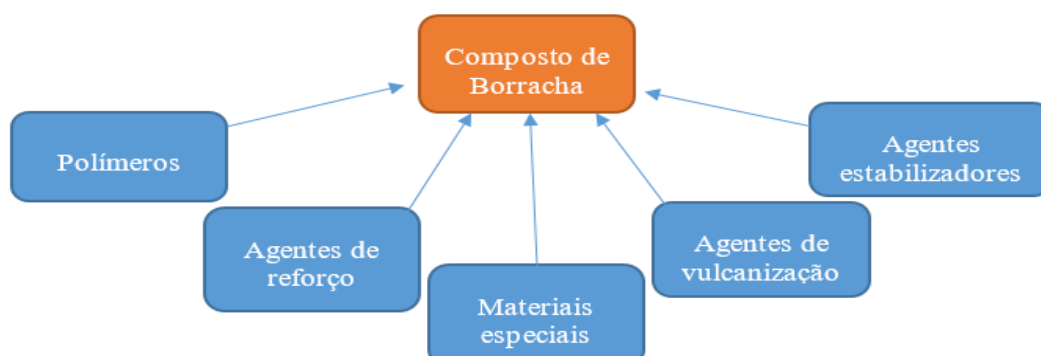


Figura 10- Componentes de um composto de borracha (adaptado de [11], [12]).

Têm sido utilizados vários elastômeros na construção de pneus, salientando-se os seguintes:

Borracha natural

A borracha natural melhora a adesão entre os componentes, a resistência ao rasgamento, e permite que as temperaturas geradas durante a utilização do pneu sejam mais baixas. Oferece uma alta aderência em pisos secos, e moderadamente alta em pisos molhados. Em contrapartida, é bastante permeável aos gases. A resistência ao envelhecimento e à deterioração por ação do ozono também é baixa. As paredes laterais e o piso do pneu eram construídas neste material, mas hoje em dia é misturada com borrachas sintéticas [12], [13].

Borracha Sintética

Alguns exemplos de borrachas sintéticas mais utilizadas na produção de pneus são:

- Estireno-butadieno: É, provavelmente, a borracha sintética mais utilizada na indústria dos pneus. Oferece melhores propriedades no que toca à tração e à adesão, o que melhora a não derrapagem em pisos molhados, enquanto conserva uma boa resistência à abrasão. Além disso, esta borracha tem grande grau de absorção de energia no domínio elástico (alta histerese). Em contrapartida, oferece uma resistência ao rasgamento baixa em relação à borracha natural. [12], [13].
- Polibutadieno: É caracterizado por ter uma excecional resistência ao desgaste, bem como uma grande estabilidade em resposta a solicitações térmicas. Na produção de pneus, a borracha de polibutadieno é normalmente misturada com a borracha de estireno-butadieno. Quando misturada nas proporções certas (15 a 50%), é possível obter melhorias na resistência ao desgaste e no desempenho do pneu em pisos escorregadios [12], [13].
- Butílica e Halobutílica: Estas borrachas sintéticas possuem uma alta impermeabilidade a gases e, por isso, são usadas de forma comum nas camadas impermeáveis do pneu (*inner liner*). Absorvem pouca água e têm uma boa resistência ao calor, oxigénio e ozono, assim como ao desgaste [12], [13].

Estes elastômeros são misturados em diversas proporções, de forma a obter o melhor de cada um, consoante o tipo de pneu e a função que este irá desempenhar.

Além disso são introduzidos outros compostos químicos, de forma a obter ainda melhores propriedades:

Os agentes de reforço utilizados são sobretudo o negro de fumo, apesar da utilização de sílicas estar a aumentar. O tamanho das partículas, quer do negro de fumo, quer das sílicas, tem influência nas propriedades finais da borracha. Existem ainda outras propriedades destes agentes de reforço que se devem considerar, como a distribuição das partículas, no caso do negro de fumo os grupos químicos funcionais, e no que toca às sílicas, a sua capacidade de hidratação. A borracha vulcanizada não apresenta uma resistência ao desgaste e abrasão muito elevada, e estes agentes são utilizados para melhorar essas características, através de combinações químicas. As proporções destas variam consoante a aplicação do composto criado. Por exemplo, o piso e a parede lateral vão ter diferentes quantidades destes compostos [12]–[15].

Os estabilizadores são compostos que protegem as borrachas da degradação provocada por reações de oxidação. Estas reações podem ser aceleradas por diversos fatores como, por exemplo, o ozono, o oxigénio, a radiação e a temperatura, entre outros. Os antioxidantes e antiozonantes podem funcionar física ou quimicamente. Os estabilizadores químicos reagem com os agentes degradantes, de forma a que estes não reajam com a borracha, sendo os mais comuns as aminas aromáticas, compostos fenólicos e fosfitos. Já os estabilizadores físicos promovem uma barreira na superfície da borracha, protegendo o pneu. Os mais comuns são as ceras microcristalinas [12], [14], [15].

Os componentes do sistema de vulcanização dividem-se tipicamente nos seguintes grupos:

- Ativadores, utilizados para promover a vulcanização, e que são normalmente combinados com agentes aceleradores. Dois exemplos dos mais usados são o óxido de zinco e o ácido esteárico, que formam um sal que reage com os aceleradores e com os produtos da reação entre os aceleradores e o enxofre, com o objetivo de aumentar a velocidade da vulcanização [4], [16].
- Agentes de vulcanização, são substâncias que reagem com os elastómeros no processo de vulcanização, de modo a conferir melhores propriedades mecânicas aos produtos. O agente mais comum é o enxofre, mas existem outros como, por exemplo, os peróxidos [4].

- Aceleradores são produtos que, combinados com o agente de vulcanização e ativadores que reduzem o tempo e a temperatura de vulcanização, aumentam a taxa de ligações num composto de borracha. Podem ser agrupados quimicamente ou consoante a velocidade/taxa de vulcanização, como se pode verificar na Tabela 1 [12], [13].

Tabela 1- Classificação dos agentes aceleradores (adaptada de [17]).

Aceleradores	Grupo Químico	Velocidade de vulcanização
BA, HMT	<i>Aldehyde Amine</i>	Lenta
DPG, DOTG	<i>Guanidine</i>	Lenta
MBT, MBTS, ZMBT	<i>Thiazole</i>	Semi ultra rápida
ZBDP	<i>Thiophosphate</i>	Ultra rápida
CBS, TBBS, MBS, DCBS	<i>Sulfenamides</i>	Ação rápida com <i>delay</i>
ETU, DPTU, DBTU	<i>Thiourea</i>	Ultra rápida
TNTN, TMTD, DPTT, TBzTD	<i>Thiuram</i>	Ultra rápida
ZDMC, ZDEC, ZDBC, ZBEC	<i>Dithiocarbamate</i>	Ultra rápida
ZIX	<i>Xanthates</i>	Ultra rápida

- Agentes retardadores/anti-reversivos, utilizados com o intuito de obter as melhores propriedades da borracha após a vulcanização, uma vez que esta pode continuar depois de se atingir o ponto ótimo, levando à perda de ligações cruzadas, o que se reflete posteriormente nas propriedades da borracha.

Os componentes especiais podem ser:

- Óleos de processamento, como óleos aromáticos, nafténicos e parafínicos, cuja função é auxiliar o processamento, mas também podem tornar a borracha mais plástica e melhorar a resistência ao desgaste [12], [13].
- Plastificantes, é o termo usado para se referir uma classe de materiais que engloba ésteres, polietileno de baixo peso molecular e alcatrão de pinho. A adição dos variados materiais, tem como objetivo obter diferentes propriedades. O alcatrão de pinho, por exemplo, promove a resistência à fadiga e a adesão entre componentes [12].
- Peptizadores químicos, que removem os radicais livres formados durante a mistura inicial dos elastómeros, de forma a prevenir que não ocorra uma redução da viscosidade por recombinação entre os polímeros. Podem ser, por

exemplo, a fenilidrazina e o disulfeto de fenila [12].

- Resinas que podem ser classificadas como hidrocarbonetos, resinas de petróleo e resinas fenólicas. Estas podem funcionar como agentes de reforço, ou até como agente de adesão [12].
- Fibras curtas, que promovem a resistência da mistura, como a resistência à tração, à fadiga, ao entalhe e ao crescimento de fissuras. Estas fibras podem ser de *nylon*, poliéster, fibra de vidro entre outros [12].

Como se pode verificar, grande parte das substâncias utilizadas têm como objetivo aumentar a resistência da borracha.

No caso da indústria de pneus, é importante obter produtos muito resistentes, pois estes são considerados elementos de segurança e têm de resistir a situações adversas durante a sua utilização. Assim, encontra-se nestes produtos características como:

- Alta resistência ao entalhe.
- Alta resistência à propagação de fissuras.
- Alta resistência à abrasão.

É de referir que estas propriedades da borracha vão refletir-se numa menor durabilidade das ferramentas utilizadas para remover a rebarba dos pneus.

2.2 Mecanismos de corte da rebarba

Na literatura, surgem distintos métodos de acabamento e remoção de excessos de material de diversos produtos. É de salientar que a remoção da rebarba do pneu é importante, mas esse processo tem de ser efetuado sem danificar ou prejudicar as suas propriedades.

Um dos métodos baseia-se na utilização de uma máquina giratória, que faz rodar os produtos entre eles, de forma a eliminar o excesso de material por fricção. Este método, dependendo do material, pode ser realizado à temperatura ambiente ou a temperaturas extremamente baixas, na ordem dos -150°C , mergulhando o produto num líquido criogénico (tipicamente azoto líquido), tornando a rebarba frágil e quebradiça [18].

No caso dos pneus, existem zonas onde os excessos de rebarba não seriam removidos por fricção, devido à ausência de contacto. Por isso, após a aplicação do líquido criogénico no excesso de material, é necessário efetuar a sua remoção, sendo esta mais fácil devido às propriedades (quebradiças) da borracha a temperaturas criogénicas. Esta solução envolve custos elevados, devido à necessidade de obter grandes quantidades de azoto líquido e de preparar as

unidades fabris para a realização desta técnica, além de ainda não serem conhecidos os efeitos a longo prazo nos pneus [19], [20].

Outro processo, com semelhanças ao anteriormente referido, consiste em manter temperaturas baixas através de um líquido criogénico, enquanto que são projetadas partículas abrasivas, removendo a borracha em excesso. Este método, além das desvantagens referidas no anterior, é suscetível de danificar o pneu [18]. Na Figura 11 vê-se uma imagem representativa de um pneu arrefecido até baixas temperaturas, por intermédio de um líquido criogénico.



Figura 11- Pneu arrefecido a temperaturas criogénicas [19].

Uma outra forma de remoção de excessos de material, utilizado na indústria de materiais poliméricos, passa pelo uso de ferramentas abrasivas, de maneira a polir e remover estas rebarbas. A ideologia do processo é de certa forma semelhante à utilizada na recauchutagem de pneus onde se remove de forma abrasiva o piso do pneu. Este processo pode danificar o pneu de uma forma irreversível, caso a ferramenta utilizada não tenha um posicionamento rigoroso, o que é difícil, dada a complexidade e variedade de artigos produzidos na indústria de pneus [20].

Existem produtos nos quais se projeta propositadamente um excesso de material, para que depois seja removido. Este método consiste em criar uma variação de volume ao longo da rebarba, originando uma zona com menor secção. Por ação de uma força, a rebarba é puxada, sendo removida pela zona menos resistente (menor secção). Este processo não vai de encontro às necessidades, pois o corte da rebarba pode ser irregular, ficando o pneu com mau acabamento [18].

Uma outra opção é o corte via laser que, apesar da sua alta precisão a remover todos os tipos de rebarba, emite fumo e é possível ocorrer a inflamação do pneu. Este processo é extremamente complexo de controlar e, por essa razão, não é abordado nesta tese.

Apesar da procura por novas alternativas para o corte da rebarba, o método mais comum e atualmente utilizado para a remoção da rebarba, consiste em utilizar ferramentas de corte do tipo faca (Figura 12). Este foi implementado há várias décadas, e tem vindo a ser utilizado ao

longo dos anos, por ser uma solução simples e eficaz. Com o constante desenvolvimento, inovação e procura por melhoria do processo de corte, ao longo dos anos foram desenvolvidas várias ferramentas de corte. No entanto, atualmente, estas apresentam ainda a contrariedade de exibir uma fraca durabilidade.



Figura 12- Exemplo de ferramentas desenvolvidas para o corte da rebarba [21].

2.3 Desgaste

O fenómeno de desgaste, de uma forma geral, consiste na remoção de material devido ao contacto de duas superfícies sólidas durante o seu movimento relativo. A remoção de material pode ocorrer numa das superfícies, ou até em ambas.

Este fenómeno pode surgir devido a diferentes mecanismos, e esses podem ser divididos em dois grandes grupos: desgaste por ação mecânica e desgaste por ação química. Existem vários mecanismos de desgaste, sendo que os mais importantes estão representados na Tabela 2 [22], [23] .

Tabela 2 - Tipos de mecanismos de desgaste (adaptado de [22]).

Adesão
Abrasão
Fadiga
Erosão por impacto
Química (ou Corrosão)
Desgaste induzido por arco elétrico

De acordo com algumas estimativas [22], dois terços das situações de desgaste em ambientes industriais ocorrem devido aos mecanismos de adesão e abrasão, sendo estes os mais importantes/comuns. Alguns fatores que estão normalmente relacionados com as taxas de desgaste de duas superfícies a deslizarem entre si, encontram-se listados na Tabela 3.

Tabela 3- Fatores que influenciam as taxas de desgaste a seco [23].

Força normal
Velocidade relativa de deslizamento
Geometria
Temperatura
Meio envolvente
Propriedades mecânicas, químicas e térmicas dos materiais envolvidos

O desgaste adesivo ocorre devido ao deslizamento entre duas superfícies, onde no ponto de contacto, devido à rugosidade e dureza dos materiais, são arrancados fragmentos de um material, aderindo à superfície do outro. Isto pode acontecer quando a força de adesão entre as superfícies é suficientemente elevada para resistir ao movimento, e gerar a transferência de um pequeno fragmento redondo e irregular, como se verifica na imagem a) da Figura 13. Um outro mecanismo trata-se da deformação plástica sucessiva, até que se dá o arrancamento de um fragmento em forma de cunha, tal como se encontra representado na imagem b) da Figura 13 [22].

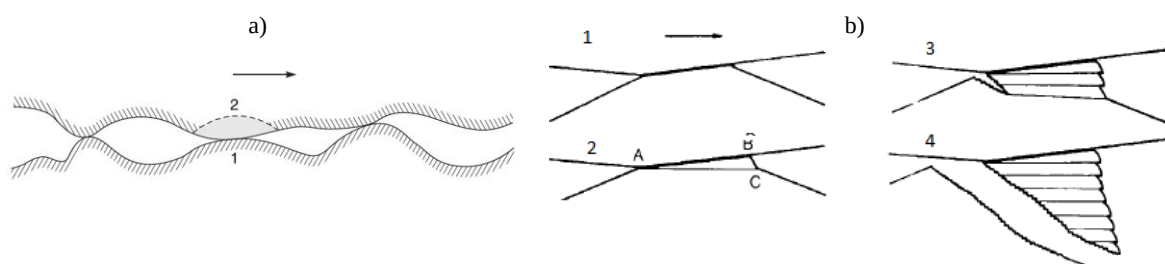


Figura 13 - Mecanismos de desgaste por adesão. a) formação de um fragmento redondo irregular; b) formação de um fragmento em forma de cunha. A numeração representa a ordem cronológica (adaptado de [22]).

Por sua vez, o desgaste abrasivo consiste na deformação plástica ou fratura de uma superfície mais macia, quando uma superfície dura ou partículas duras deslizam sobre esta. Para materiais mais dúcteis, esta dá-se segundo a deformação plástica enquanto que a fratura ocorre em materiais mais frágeis. Além desses dois mecanismos, o desgaste pode-se dar também por fadiga e por arranque de grãos de uma superfície. Pode se verificar estes mecanismos de desgaste abrasivo na imagem da Figura 14 [22], [24].

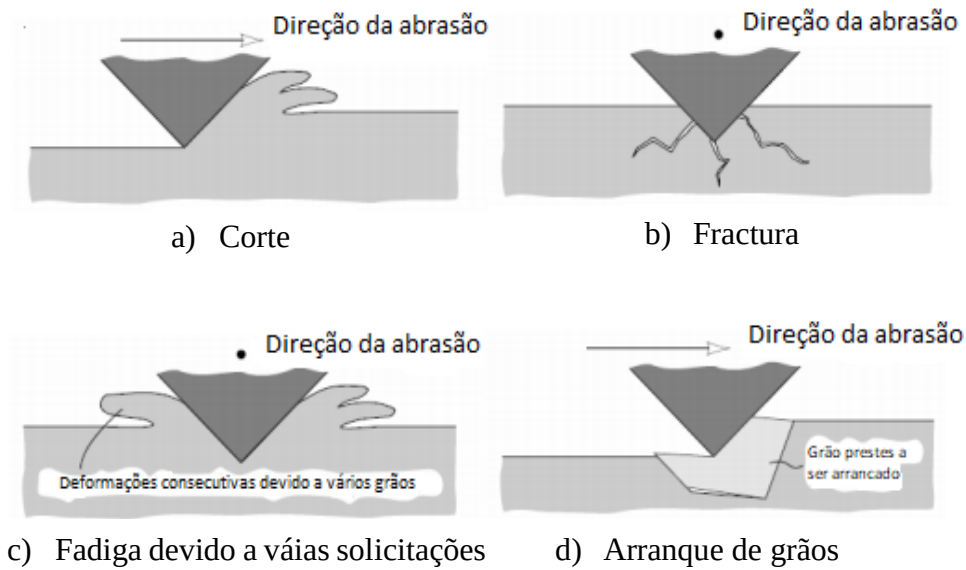


Figura 14 - Mecanismos de desgaste por abrasão (adaptado de [24]).

O mecanismo de desgaste por abrasão pode ser dividido em dois casos. O primeiro é resultado da abrasão entre dois corpos em que duas superfícies deslizam uma sobre a outra e uma é mais dura, como acontece geralmente em operações de maquinagem e de corte. O segundo caso é a da abrasão por três corpos, onde existe uma partícula suficientemente dura de forma a desgastar ambas ou apenas uma das superfícies. Esses mecanismos estão representados nas imagens a) e b) da Figura 15 [22], [24].

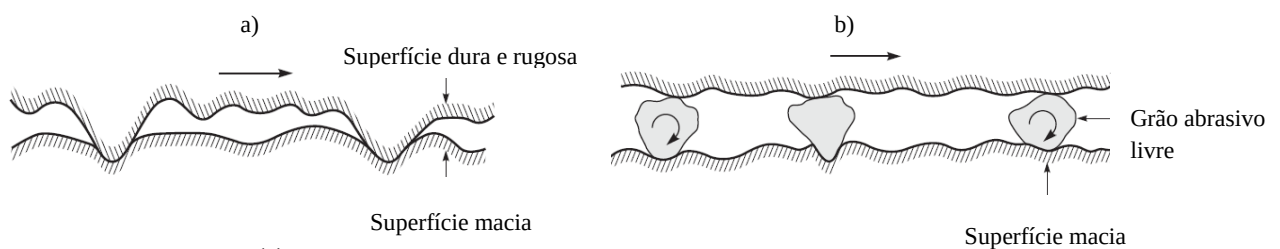


Figura 15 - - Esquemas de abrasão a) por dois corpos; b) por três corpos (adaptado de [22]).

2.4 Materiais e tratamentos para ferramentas de corte

2.4.1 Aços

Os aços podem ser classificados de diferentes formas, de acordo com determinados parâmetros, como por exemplo: a microestrutura; a forma do produto; o tratamento térmico, composição química, entre outros [25].

Uma outra forma de classificar os aços, além das referidas anteriormente, é através da aplicação à qual se destina, como por exemplo [25]:

- aços estruturais;
- aços para molas;
- aços para ferramentas.

Destes, os que têm especial importância para o produto a desenvolver, são os aços para ferramentas, pois são os aços usados para obter as ferramentas cujo objetivo é conformar ou cortar outros materiais [26], [27].

Este tipo de aços pode ser dividido em vários grupos, baseados em diferentes aspetos, nomeadamente os elementos de liga, aplicações e tratamentos térmicos (Tabela 4).

Tabela 4- Classificação dos aços para ferramentas, adaptado de [29].

Classificação	Grupo	Classificação	Grupo
Aços rápidos	M T	Aços para trabalho a quente	H
Aços resistentes ao choque	S	Aços para moldes	P
Aços de baixa liga para fins especiais	L	Aços temperados em água	W
	A		
Aços para trabalho a frio	D O		

Das diferentes classificações de aços representadas na tabela anterior, aqueles mais indicados para a ferramenta que se pretende desenvolver nesta dissertação são os enquadrados na categoria “para trabalho a frio”.

Existem vários elementos de liga utilizados nos aços, e estes comportam-se de diferentes formas. Existem dois grupos: os que estabilizam a fase austenítica (gamagêneos) e os que estabilizam a fase ferrítica (alfagêneos).

Tabela 5- Elementos de liga gamagêneos e alfavéneo adaptado de [29].

Elementos gamagêneos	C, Co, Cu, Mn, Ni, N
Elementos alfavêneos	Cr, Mo, Nb, Si,, Ti, W, Zr

Nos aços, existem elementos de liga que estão sempre presentes, mesmo que em quantidades residuais, como por exemplo o manganês e o silício.

O **manganês** impede que o enxofre se combine com o ferro, pois os sulfuretos de ferro podem ser prejudiciais para as propriedades do aço, e promove a desoxidação do aço. Apesar de não formar carbonetos, dissolve-se na matriz, promovendo a resistência, pois aumenta a temperabilidade do aço.

O **silício** remove, à semelhança do manganês, o oxigénio dissolvido no aço e, além disso, dissolve-se na matriz, promovendo a resistência do aço e a temperabilidade [27]–[29][30].

O **carbono** é o elemento mais importante, pois a sua quantidade vai definir a dureza do aço, quer através da formação de carbonetos, quer pela dureza da matriz onde estes se encontram. O aumento do teor deste elemento de liga está relacionado com o aumento de dureza e com a temperabilidade do aço, contudo aumenta a fragilidade [27], [28].

A presença de carbonetos é importante para diversas aplicações, e alguns dos elementos de liga mais comuns na formação de carbonetos são:

O **vanádio**, além da forte tendência para formar carbonetos, este elemento atua como um refinador de grão. Este elemento assegura o endurecimento secundário, aquando dos tratamentos de revenido. O vanádio apresenta outros efeitos importantes, como a melhoria da resistência a entalhes, bem como a resistência ao desgaste, associada a uma maior durabilidade das arestas de corte [30], [31].

O **crómio** pode formar vários tipos de carbonetos, dependendo do rácio Cr/C. Para rácios mais altos, têm-se carbonetos mais complexos. A presença destes carbonetos melhora a resistência ao desgaste e estão associados à qualidade de reter uma aresta de corte. Além disso,

este está associado ao aumento da temperabilidade dos aços, bem como à resistência à corrosão e oxidação [31].

O **tungstênio** e o **molibdênio** têm efeitos similares nos aços, para além de ambos serem formadores de carbonetos [31]. Ambos os elementos provocam nos aços um endurecimento secundário, quando sujeitos a um revenido. É referido que o tungstênio se opõe ao crescimento do tamanho de grão. De forma similar, a adição de molibdênio está associada com a produção de aços com grãos finos. A presença dos carbonetos formados por ambos os elementos de liga, está associada a um melhor desempenho, quando estes aços são usados em ferramentas de corte [30], [31].

Na Tabela 6 estão representadas as durezas dos carbonetos formados por estes elementos, assim como a dureza típica de um aço temperado.

Tabela 6- Dureza de um aço comum e de alguns carbonetos presentes no aço (adaptado de [32].)

Aço temperado	60/65 HRC
Carbonetos de crómio	66/68 HRC
Carbonetos de Tungstênio e Molibdênio	72/77 HRC
Carbonetos de Vanádio	82/84 HRC

Além disso, a adição destes elementos de liga tem influência na temperatura eutectóide e deslocam o ponto eutectóide para a esquerda (Figura 16), influenciando assim as percentagens das fases presentes no aço. Ao formarem carbonetos, estes elementos de liga reduzem a percentagem de carbono dissolvido na austenite, afetando a dureza final da têmpera martensítica [30], [31].

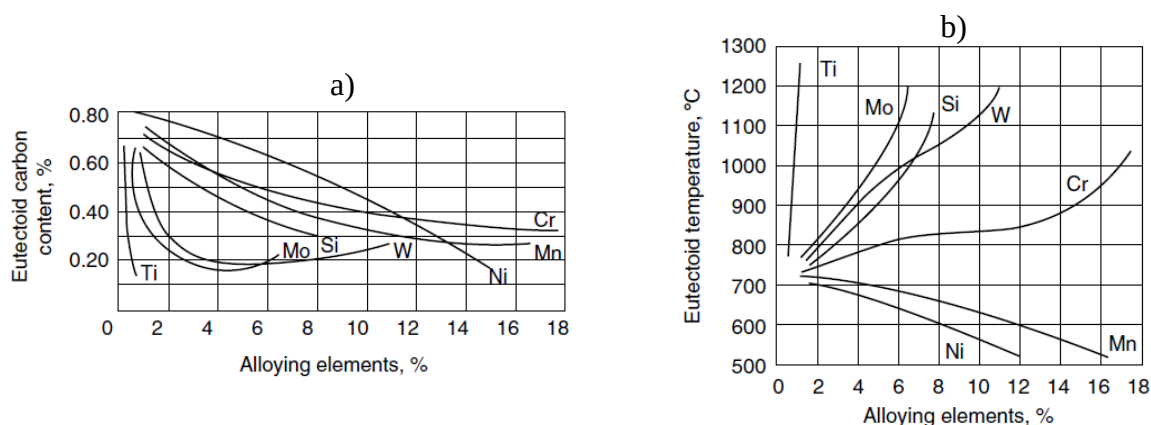


Figura 16 - Efeito dos elementos de liga, a) no teor em carbono do ponto eutectóide. b) Na temperatura de transformação eutectóide (adaptado de [31]).

Estes têm também influência nas estruturas que surgem após os tratamentos térmicos, fazendo com que os aços sejam mais ou menos suscetíveis a transformações como, por exemplo, a da austenite em martensite. Isso é perceptível nos diagramas da Figura 17, onde se pode ver a influência da quantidade destes elementos na temperatura a que ocorre a transformação em martensite [31].

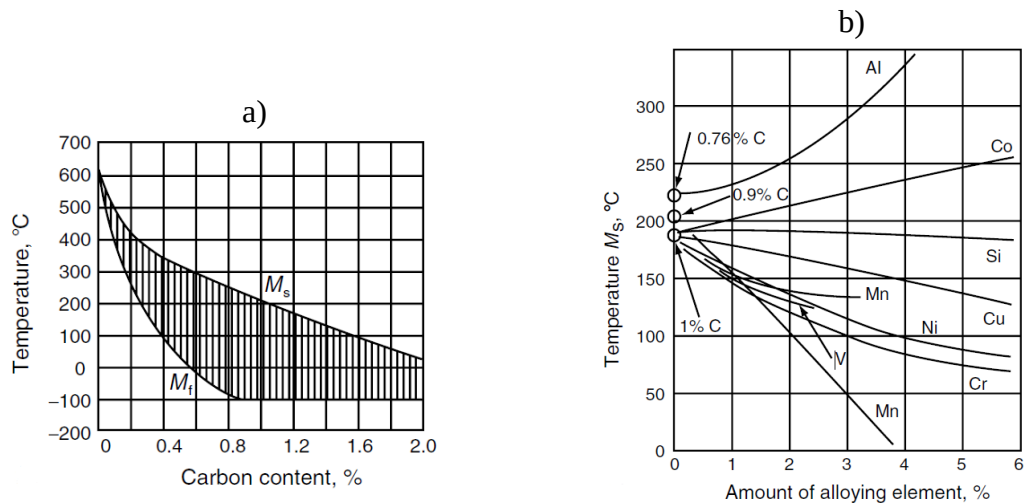


Figura 17 - Influência da quantidade de a) carbono e b) elementos de liga para 1% de carbono no ponto de transformação martensítica (adaptado de [31]).

Dependendo da área e do tipo de trabalho a que as ferramentas estão sujeitas, para que estas apresentem o melhor desempenho e durabilidade, é necessário ajustar as propriedades mecânicas como a tenacidade e a resistência à abrasão. Estas propriedades estão dependentes de vários fatores que acabam por estar interligados, como por exemplo [33]:

- Composição química;
- Tratamento térmico;
- Tamanho do grão;
- Microestrutura;
- Presença e morfologia de carbonetos;
- Dureza.

A resistência ao desgaste dos diversos materiais tem sido alvo de estudo em diversas áreas, pois o desgaste por abrasão dos materiais é uma das principais causas de falha das ferramentas [33].

Dada a natureza abrasiva da borracha do pneu, quando este é cortado, é necessário que na construção da ferramenta de corte seja utilizado um aço com uma boa resistência ao desgaste.

Como já referido, a dureza é um aspeto muito importante, que está relacionado com a resistência ao desgaste dos materiais. Kešner et al. [34] realizaram um estudo onde averiguaram a influência da microestrutura na resistência ao desgaste. Neste, utilizaram distintas amostras dos aços AISI 4130 (DIN 25CrMo4) e AISI 6150 (DIN 51CrV4), às quais o autor atribuiu as designações C e V, respetivamente. A composição química destas amostras encontra-se na Tabela 7

Tabela 7 - Composição química dos aços utilizados no estudo [34].

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
AISI 4130	0.25	0.71	0.23	0.018	0.022	1.03	0.09
AISI 6150	0.53	0.89	0.26	0.012	0.025	1.02	0.08
	Cu	Al	Mo	Sn	V	Ti	
AISI 4130	0.23	0.023	0.21	0.011	0.004	0.015	
AISI 6150	0.13	0.028	0.02	-	0.12	-	

As amostras foram aquecidas em ar até uma temperatura de 800 °C durante 1200 segundos. De seguida, foram escolhidos vários parâmetros de arrefecimento, de modo a obter microestruturas com combinações distintas de bainite e martensite.

Os ensaios de desgaste foram realizados segundo o teste ASTM G65. Este consiste em fazer um disco de borracha rodar sobre uma amostra, estando o contacto entre estes, sujeito a uma força e à presença de partículas abrasivas.

Na Figura 18 observa-se a variação da dureza em função da percentagem de bainite. A variação do desgaste obtido para cada amostra encontra-se representada na Figura 19. Verifica-se então que, de modo geral, quanto maior for a dureza das amostras, menor será o seu desgaste. A amostra para a qual se verificou maior dureza, correspondeu à que apresentou melhor resistência ao desgaste. Esta era composta por cerca de 60-80% de bainite.

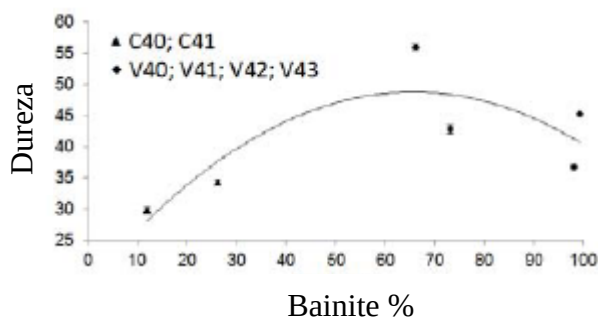


Figura 18 - Variação da dureza em função da percentagem de bainite (adaptado de [34]).

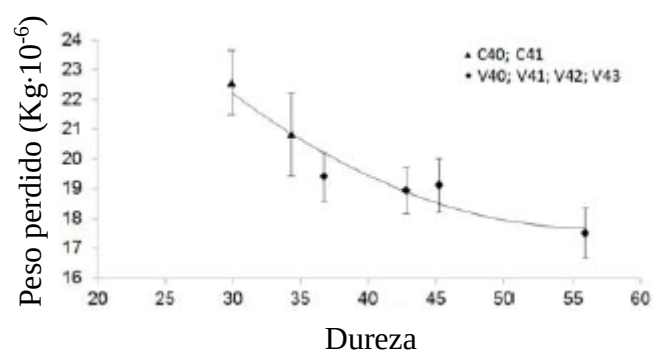


Figura 19 - Variação do desgaste em função da dureza (adaptado de [34]).

Bhattacharya et al. [35] realizaram também um estudo relacionado com a resistência ao desgaste, analisando a influência de distintas microestruturas, obtidas através de variações nos tratamentos térmicos. Neste estudo utilizaram um aço, cuja composição química está presente na Tabela 8. Os autores referem-se a este aço como um aço comercial, não mencionando a sua norma.

Tabela 8 - Composição química do aço utilizado no estudo [35].

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0.21	0.25	1.3	0.007	0.011	0.22	0.20	0.14	0.004	0.012

Os tratamentos térmicos efetuados diferiram na fase de arrefecimento. Estes tratamentos consistiram em aquecer as amostras durante uma hora a uma temperatura de 900 °C. Posteriormente, realizaram três tipos de arrefecimento:

- Arrefecimento controlado num forno, de modo a obter uma estrutura de ferrite-perlite (FP);
- Arrefecimento até 450 °C, onde se fez um estágio de uma hora, arrefecendo depois ao ar, obtendo uma estrutura de ferrite-bainite (FB);
- Recozido a uma temperatura 725 °C durante uma hora, seguido de têmpera em água, de modo a obter uma estrutura composta por ferrite-martensite (FM).

O comportamento ao desgaste foi analisado, utilizando um teste que consistiu em fazer deslizar as amostras numa lixa de SiC a uma velocidade constante durante vinte segundos, recorrendo a um tribómetro do tipo pino-disco.

Os resultados obtidos encontram-se na Figura 20 e verifica-se que a amostra que obteve um melhor comportamento ao desgaste era composta por martensite. Apesar de não mencionar os valores de dureza das amostras, o autor refere que os melhores resultados desta amostra estão relacionados com a maior dureza da martensite. Uma vez que esta é mais dura, em comparação com a bainite e perlite, protege de forma mais eficaz a fase ferrítica, que é mais macia, resultando num menor desgaste da amostra.

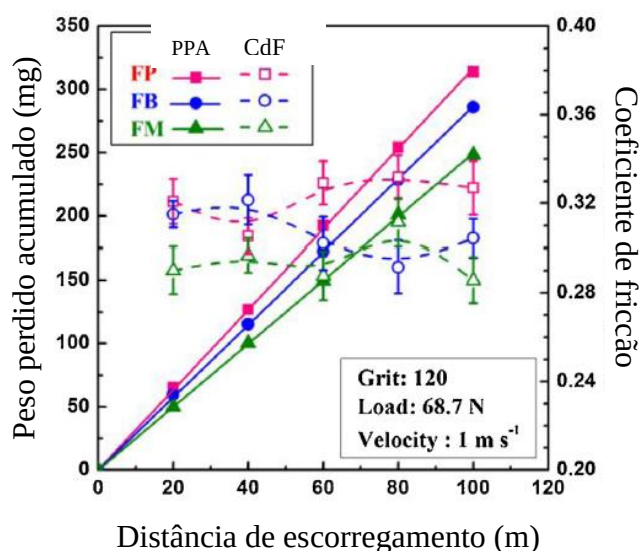


Figura 20 - Peso perdido acumulado (PPA) e coeficiente de fricção (CdF) em função da distância de escorregamento (adaptado de [35]).

À semelhança dos anteriores, o estudo [36] realizado por K. Singh et al. focou-se no efeito dos tratamentos térmicos na microestrutura de um aço AISI D2, e consequente resistência ao desgaste. Pode-se ver a composição química deste aço na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição química do aço AISI D2 usado no estudo [36].

Elementos	C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S	V
AISI D2	1.5	0.45	0.3	12	0.9	0.03	0.03	1.0

O aço foi sujeito a um recozido a 885 °C durante uma hora, de modo a remover os efeitos termomecânicos do seu processamento. De seguida, as amostras desse aço foram temperadas em óleo, sendo submetidas a uma temperatura de austenitização de 1030 °C durante 45 minutos. Posteriormente, as amostras foram sujeitas a diferentes ciclos e temperaturas de revenido, de modo a obter variações na morfologia dos carbonetos, matriz, dureza e quantidade de austenite retida. Foram atribuídas designações às amostras de acordo com o tratamento a que foram sujeitas: OQ (têmpera em óleo), AN (recozido), T523 (revenido a 523 °C), T723 (revenido a

723 °C) e T923 (revenido a 923°C). A dureza das amostras, em função do tratamento térmico ao qual foram submetidas, encontra-se representada na Figura 21.

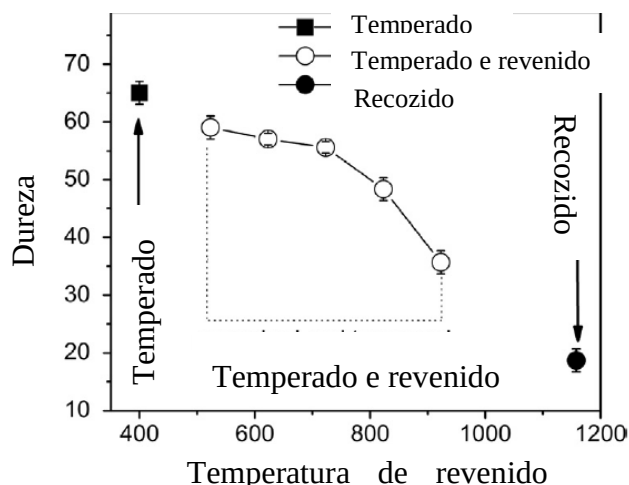


Figura 21 - Efeito da temperatura de revenido na dureza das amostras (adaptado de [36]).

As amostras foram submetidas a ensaios de abrasão de pino-disco (consiste em fazer deslizar a amostra numa superfície abrasiva, neste caso lixa de SiC), utilizando diferentes parâmetros de força e de tamanho das partículas abrasivas. Os resultados destes ensaios podem ser observados na Figura 22.

K. Singh et al. [36] concluíram que o aumento de temperatura durante o tratamento de revenido torna os carbonetos formados mais grosseiros, estando a morfologia destes e a matriz onde estão inseridos relacionados com a resistência ao desgaste. A amostra que apresentou melhor comportamento ao desgaste foi apenas sujeita à têmpera, apresentando uma matriz martensítica dura, com carbonetos finos. Por outro lado, a amostra sujeita a uma temperatura de revenido mais elevada, foi a que apresentou um maior desgaste, estando relacionado isso com a presença de carbonetos grosseiros numa matriz mais macia, em comparação com as restantes.

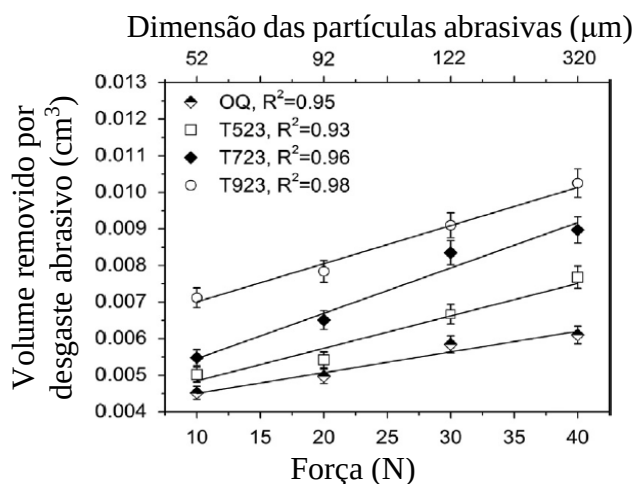


Figura 22 - Variação do volume de desgaste em função da força aplicada e dimensão das partículas abrasivas (adaptado de [36]).

M. Orečný et al. [37] realizaram um estudo semelhante aos anteriores, utilizando amostras dos aços AISI52100 e AISI D3. A composição química destes aços encontra-se representada na Tabela 10.

Segundo os autores estas amostras foram submetidas aos tratamentos térmicos indicados na Tabela 11, não indicando o meio.

Tabela 10 - Composição química dos aços AISI 52100 e D3 [37].

Material	C	Mn	Si	Cr
AISI 52100	1.1	0.5	0.35	1.5
AISI D3	2	0.5	0.4	12

Tabela 11 - Condições dos tratamentos térmicos realizados no estudo (adaptado de [37]).

	AISI 52100 (Caso A)	AISI D3 (Caso B)	AISI D3 (Caso C)
Têmpera	820 °C	960 °C	1100 °C
Revenido	170 °C / 2 h	180 °C / 2 h	550 °C / 2 h

A metodologia do ensaio de desgaste efetuado não foi referida, no entanto os resultados consistem na massa que as amostras perderam. Na Tabela 12 podemos observar os valores obtidos através dos ensaios, bem como os valores de dureza após os tratamentos térmicos.

Tabela 12 - Valores de desgaste (g) e de dureza obtidos (HRC) (adaptado de [37]).

Amostra	Peso perdido em média (g)	Dureza (HRC)
Caso A	0.02388	60
Caso B	0.01654	60
Caso C	0.01332	58

A amostra do caso C, apesar de não ser a que apresentava um valor de dureza maior, foi a que demonstrou maior resistência ao desgaste. A microestrutura desta era constituída por carbonetos numa matriz martensítica.

Os autores referem que esse acontecimento se deve ao facto da temperatura de austenitização ser mais elevada, resultando numa melhor dissolução dos carbonetos e do carbono na austenite, saturando-a de forma a obter as suas melhores propriedades.

Y.P. Ji et al. [38] estudaram a influência da quantidade de carbono no desgaste de aços rápidos com alto teor em vanádio (HVHSS), utilizando várias amostras. A norma do aço não foi especificada, encontrando-se a composição química das amostras na Tabela 13.

Tabela 13 - Composição química das amostras utilizadas no estudo de Y.P. Ji et al. [38].

Amostra	C	V	Cr	Mo	Si	Mn	S	P
HVHSS1	1.58	8.62	4.12	2.76	0.62	0.22	≤ 0.07	
HVHSS2	1.90	8.52	4.35	2.82	1.03	0.31		
HVHSS3	2.23	9.75	4.68	3.25	0.94	0.25		
HVHSS4	2.588	9.30	4.28	3.43	0.83	0.20		
HVHSS5	2.82	8.99	3.98	2.75	1.04	0.13		
HVHSS6	2.92	9.03	4.32	3.00	1.15	0.16		

As amostras foram sujeitas a uma temperatura de austenitização de 1050 °C durante 2 horas, com posterior arrefecimento ao ar. De seguida, foi efetuada uma têmpera a 550 °C. O ensaio de desgaste consistiu em rodar sobre as amostras um disco do material AISI 5140 (composição química na Tabela 15) com uma dureza de 50 HRC, a uma velocidade constante de 400 rpm durante 120 minutos, sendo aplicada uma força de 300 N. Na Figura 23 observam-se os resultados dos ensaios de desgaste, bem como as durezas das respectivas amostras.

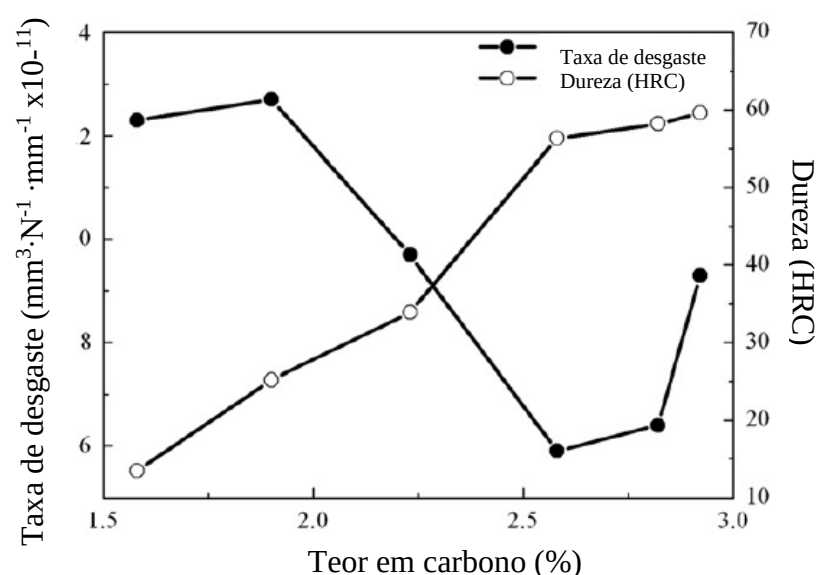


Figura 23 - Taxa de desgaste e dureza das amostras em função da quantidade de carbono relativos ao estudo de Y.P. Ji et al. (adaptado de [38]).

De modo a explicar os resultados obtidos, os autores observaram as microestruturas das amostras, uma vez que a quantidade de carbono disponível na matriz é um fator determinante

nas suas características. As matrizes obtidas para cada tipo de amostras podem ser observadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Matriz observada em cada amostra do estudo de Y.P. Ji et al. (adaptado de [38]).

Amostra	Matriz
HVHSS1	Essencialmente ferrite
HVHSS2	Ferrite, austenite residual e martensite temperada
HVHSS3	Martensite revenida e austenite residual
HVHSS4	Martensite em rede
HVHSS5	Não mencionado
HVHSS6	Martensite em forma de agulhas

Tabela 15 - Composição química do aço AISI 5140 [39].

Material	C	Si	Mn	Cr	S	P
AISI 5140	0.38-0.43	0.15-0.30	0.7-0.9	0.7-0.9	≤0.04	≤0.035

Os autores concluíram que, para teores em carbono abaixo de 2.58%, a resistência ao desgaste é influenciada sobretudo pela dureza da matriz, sendo superior para matrizes mais duras. Para valores de carbono superiores a 2.58%, tanto a matriz como os carbonetos têm influência na resistência ao desgaste. O valor de desgaste mais baixo foi observado na amostra que tinha uma microestrutura composta por carbonetos primários de vanádio finos, numa matriz martensítica em rede.

A amostra com maior quantidade de carbono, apesar de apresentar a maior dureza, não foi a que obteve melhor resistência ao desgaste. Isso pode estar associado à morfologia da martensite obtida, sendo esta em forma de agulhas. Esse tipo de morfologia é mais suscetível a fraturar durante o processo de desgaste [38].

No que toca a ferramentas de corte, como facas, o aço, para além de uma boa resistência ao desgaste, necessita de permitir a obtenção de uma aresta de corte afiada, para que o corte seja mais suave e exija o menor esforço possível por parte do utilizador. Uma aresta é mais afiada quanto menor for o raio da intersecção das duas superfícies que a formam, como se vê na Figura 24 a). A capacidade de obter uma aresta afiada, depende do tamanho das partículas do material da ferramenta. Tendo em conta a aplicação de aços para ferramentas de corte, a morfologia de carbonetos e tamanho de grão são muito importantes, pois são estes que vão ditar a qualidade do afiamento (Figura 24 b)) [40].

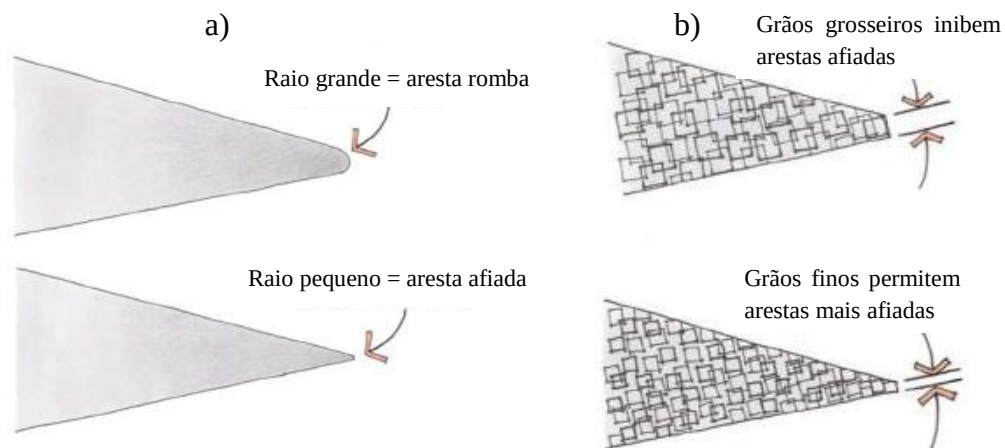


Figura 24 - Esquema representativo a) da qualidade afiamento de arestas de corte e b) da influência do tamanho das partículas na aresta (adaptado de [40]).

Concluí-se que a presença de carbonetos nos aços é essencial para a resistência ao desgaste, no entanto, para aplicações como facas e lâminas de corte, a morfologia destes deve ser pequena, para que se consiga afiar com menores dificuldades.

2.4.1.1 Processo de obtenção do aço

As propriedades mecânicas finais do aço estão também relacionadas com o modo como é obtido.

De uma forma muito sucinta, a produção comum do aço é um processo de oxidação que remove quantidades de carbono, silício, fósforo, enxofre entre outros elementos que estão presentes no metal fundido, composto por minério de ferro e/ou aço reciclado. Posteriormente, é necessário proceder à desoxidação, através de adição de elementos como o alumínio, que se combina com o oxigênio, formando compostos que ficam à superfície do metal liquefeito. É também necessário proceder à desgaseificação, utilizando processos como o *vacuum degassing* ou *vacuum arc remelting*. A composição destes aços é ajustada por adição de elementos de liga distintos, aquando da sua produção [32], [41].

Um método de produção alternativo é o processo de pulverometalurgia ou metalurgia em pó (P/M). Este processo consiste nas etapas representadas na Figura 25.

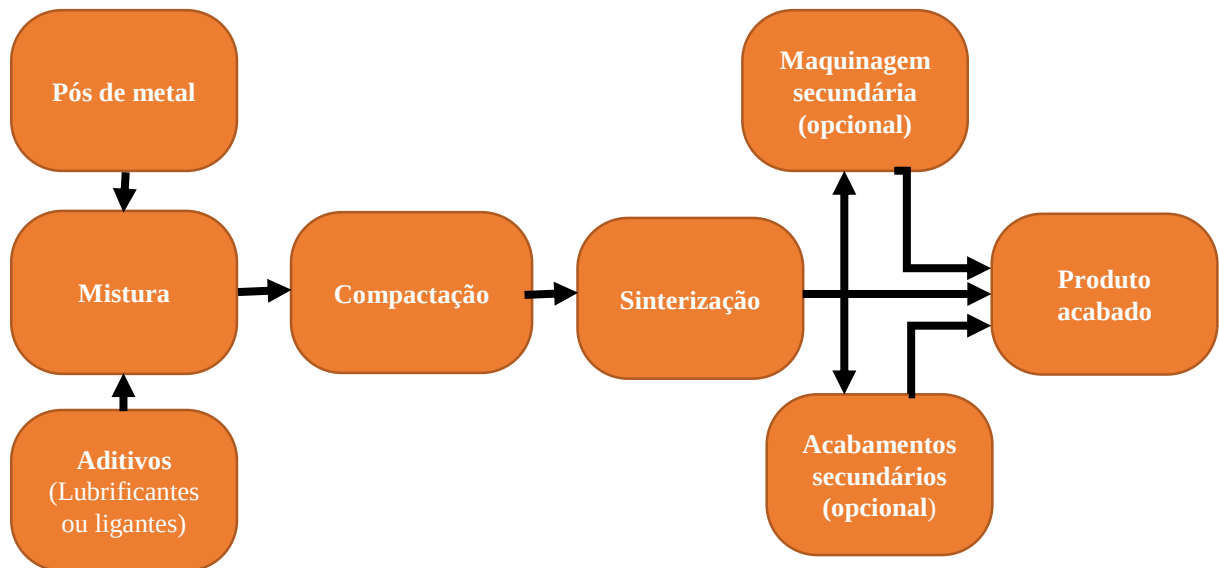


Figura 25 - Etapas do processo de pulverometalurgia (adaptado de [32]).

As propriedades dos produtos concebidos por P/M dependem também das características dos pós que se utilizam. Estes podem ter maior ou menor dimensão, ter distintas formas, ser mais ou menos porosos, entre outros aspetos que posteriormente influenciam o produto final. Isto deve-se sobretudo à forma como estes são produzidos. Alguns métodos de produção de pós são:

- Atomização do metal líquido;
- Reações químicas;
- Deposição eletrolítica;
- Processos mecânicos;
- Condensação de vapores de metal.

Após a sua produção, os pós podem ser sujeitos a tratamentos térmicos e operações de secagem, para os preparar para as etapas seguintes.

Depois de se inspecionar os pós, estes são misturados, combinando pós de metal puro ou de material não metálico e ligantes, obtendo-se a composição química final. Posteriormente, dá-se a compactação dos pós, formando o produto em verde. Pretende-se que esse produto tenha uma alta densidade e uma boa uniformidade. Após esta etapa, dá-se a sinterização, onde se utilizam temperaturas suficientemente altas para que ocorra a difusão no estado sólido, mas que não ultrapassem o ponto de fusão da maioria dos elementos que compõem o produto. A sinterização está dividida em três fases. Na primeira dá-se um pré-aquecimento bastante controlado, onde se removem os ligantes e lubrificantes utilizados nas fases anteriores, e

também qualquer vestígio de ar. Na segunda, através da aplicação de altas temperaturas, dá-se a ligação entre os pós. Nesta fase, o tempo de estágio é importante, influenciando as características finais do produto. Por fim, dá-se o arrefecimento em atmosfera controlada, para que não ocorra oxidação ou um choque térmico, devido a um arrefecimento muito rápido. Todas as etapas da sinterização devem estar sujeitas a uma atmosfera sem oxigénio ou em vácuo. Após isto, os produtos podem ser submetidos a operações de acabamento, ou a operações secundárias como [32]:

- *Repressing* – Os produtos são submetidos a pressões altas de forma a melhorar, a precisão dimensional. Se nesta operação o metal sofrer grandes deformações dá-se o nome de *P/M forging*.
- *Impregnation* – Força-se óleo ou outro líquido, como uma resina polimérica, a preencher os poros.
- *Infiltration* – Um metal com ponto de fusão mais baixo que o produto, é forçado a preencher os poros.

As propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas com a densidade relativa e microestrutura dos produtos, sendo estas influenciadas por diversas variáveis, como o tipo e tamanho de pó, quantidade de lubrificante, temperatura e pressão utilizada, entre outros [32], [42]. Dentro do processo P/M, existem distintos métodos de obter um produto final, como por exemplo o *Hot-Isostatic Pressing* (HIP), que combina as etapas de sinterização e compactação, ou o *Powder Injection Molding* (PIM), onde se combinam os pós com um termoplástico com baixo peso molecular ou ceras, para que, após aquecer, este seja mais fácil de injetar num molde, também quente. Estas variantes dão origem a produtos com diferentes propriedades mecânicas.

De seguida apresenta-se

Tabela 16, onde se comparam as variáveis do processo P/M, podendo concluir-se que o processo HIP é aquele onde se obtêm produtos com melhores propriedades mecânicas, porém, sendo também o processo mais dispendioso [32].

Tabela 16 - Comparação de quatro métodos de processamento de pós de metal (adaptado de [32]).

Característica	Compactação e Sinterização convencional	Moldação por injeção metálica	HIP	P/M por forjamento
Tamanho da peça	Intermédio	Pequeno	Grande	Intermédio
Complexidade da peça	Boa	Excelente	Muito boa	Boa
Taxa de produção	Excelente	Boa	Fraca	Excelente
Densidade	Média	Muito boa	Excelente	Excelente
Propriedades mecânicas	80-90 % das do aço forjado	90-95% das do aço forjado	Melhores que o aço forjado	Iguais às do aço forjado
Custo	Baixo	Intermédio	Alto	Intermédio-Baixo

Este processo (pulverometalurgia) tem inconvenientes, como custos mais elevados em relação ao método convencional de produção de aços e, dependendo do método de processamento, pode originar produtos com porosidades, resultando num material com baixa resistência mecânica. Existem, no entanto, variantes como a HIP, que permitem obter produtos muito densos. Contudo, conclui-se que P/M é um processo interessante, pois permite a produção de aços com composições químicas que seriam impossíveis de obter por outro método, permitindo exceder limites de solubilidade. Além disso, permite obter produtos com uma homogeneidade muito superior aos produtos concebidos pelas restantes técnicas, originando estruturas com carbonetos muito finos e bem distribuídos que, como já se viu, estão diretamente relacionados com a resistência ao desgaste. Na Figura 26 observa-se um esquema representativo dessas microestruturas.

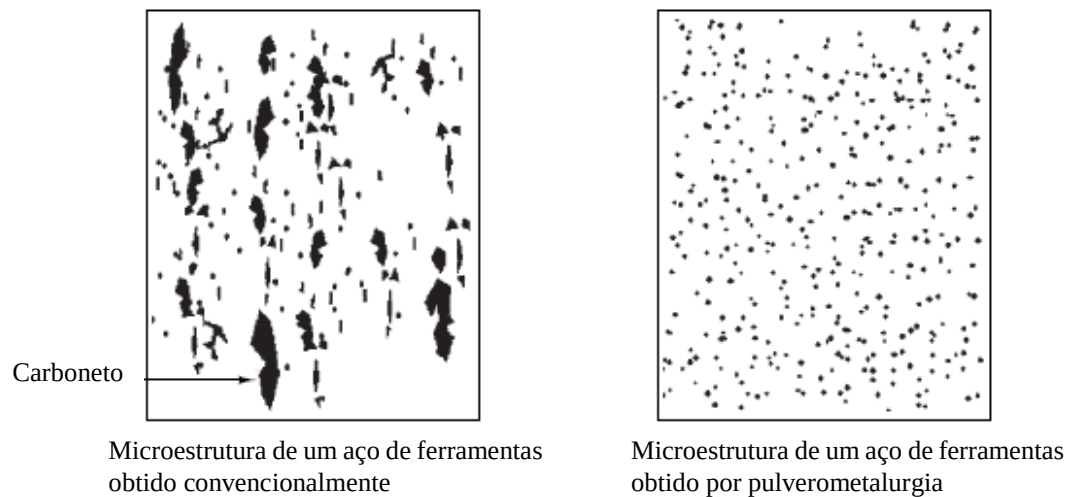


Figura 26 - Esquema representativo da microestrutura de um aço obtido convencionalmente e outro por pulverometalurgia (adaptado de [32]).

2.4.1.2 Têmpera em vácuo

O tratamento térmico de uma ferramenta é um aspecto muito importante e pode ser realizado em diferentes tipos de atmosfera. O forno com vácuo tem capacidade de reproduzir a grande maioria dos tratamentos, desde recozido, revenido e nitruração, até à têmpera. Nestas últimas, este tipo de tecnologia permite também utilizar água, óleo e gás [43].

O vácuo pode apresentar diferentes níveis, sendo estes divididos de maneira comum de acordo com a pressão, como se pode observar na Tabela 17, sendo que, os que têm a pressão mais baixa, correspondem àqueles que se encontram submetidos a níveis de vácuo maiores.

Tabela 17 - Níveis de vácuo (adaptado de [31]).

Nível de Vácuo	Pressão (Pa)
Baixo	133.32 – 1.0133E5
Médio	1.3332 – 133.32
Alto	1.3332E-4 – 1.3332
Ultra alto	<1.33E-4

Nos tratamentos térmicos, um aspecto a ter em consideração e que tem influência nos resultados obtidos, é a uniformidade da temperatura. Um ciclo de um tratamento pode ser resumido em três etapas (aquecimento, estágio e arrefecimento). É natural que durante o aquecimento e arrefecimento existam diferenças de temperatura entre o núcleo e a superfície, e são essas diferenças, a razão pela qual ocorre a distorção, que pode ser minimizada se as fases de aquecimento e arrefecimento forem feitas de forma lenta. Porém, é necessário ter em atenção

que a microestrutura, o crescimento de grão, a temperabilidade do aço e alguns outros parâmetros, influenciam o aspeto económico e, portanto, este processo necessita de ser o mais rápido possível [44].

Existem diversos fornos a vácuo, sendo que os mais comuns utilizam gases inertes para ajudar às transferências de calor. Assim sendo, o aquecimento dá-se por mecanismos de radiação e mecanismos de convecção, por meio de circulação de gases (geralmente o azoto) de forma a que a transferência de calor se dê de forma mais rápida e uniforme. Para temperaturas mais baixas, a transferência dá-se por convecção, enquanto que para temperaturas mais elevadas, acaba por haver transferência essencialmente por radiação, diminuindo-se a pressão para promover este mecanismo (mantendo uma pressão residual de modo a evitar a perda de elementos de liga para o vácuo). Pode-se verificar a vantagem da utilização dos mecanismos de alta pressão por convecção no que toca à velocidade de aquecimento da peça, na Figura 27. No aquecimento, pode-se recorrer a estágios de aquecimento, de modo a que a temperatura se torne mais uniforme. Quando se atinge a temperatura pretendida para o estágio, esta é controlada através de termopares, permitindo que o processo seja automático e reproduzível, devido à aquisição de dados bem definida das temperaturas [44]–[46].

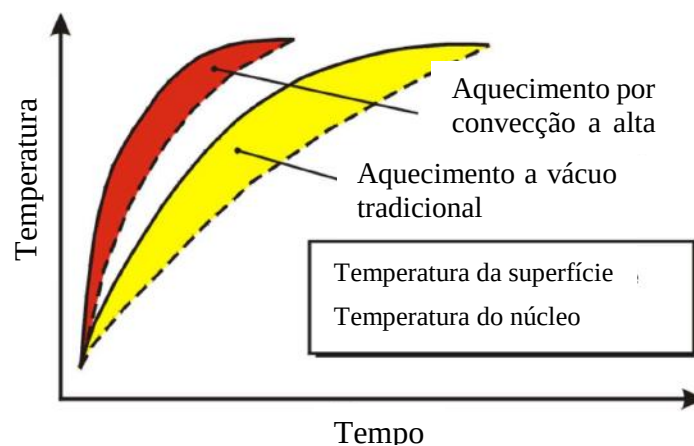


Figura 27 - Comparação entre os processos de aquecimento tradicional de vácuo e por convecção a alta pressão (adaptado de [46]).

Quando se efetua uma têmpera, tem-se que a fase de arrefecimento depende do material em questão, sendo necessário estudar-se a taxa de arrefecimento ideal, uma vez que se pretende que esta seja rápida o suficiente para que se obtenha a microestrutura pretendida (neste caso martensite), e ao mesmo tempo que seja o mais lento e uniforme possível, para evitar distorções. Isto depende de distintos parâmetros como a pressão existente no forno, o tipo de gás utilizado e a sua velocidade dentro do forno. Além disso, a direção do gás de arrefecimento é importante, podendo esta ser horizontal ou vertical. Ao longo do arrefecimento, a direção do gás altera para

que este tenha as propriedades anteriormente referidas. É de referir que, quando a direção é vertical, os tempos diferem quando o gás circula a partir da zona do topo, ou a partir da zona inferior do forno. Os tempos são também controlados, a partir da análise de temperaturas captadas pelos termopares existentes no forno [45].

Os fornos diferem nas pressões que suportam, no entanto, a variação da pressão leva a resultados distintos no que toca aos tratamentos térmicos. A influência da pressão na velocidade de arrefecimento é visível na Figura 28, que resulta de uma experiência na qual se analisou a temperatura a 16 mm de profundidade do centro de superfície de cubos com 100, 200, 300 e 400 mm de lado, a pressões de 4.5 bar e 13 bar. Verifica-se então que, com o aumento da pressão, a velocidade de arrefecimento aumenta. É expectável também que, quanto maior a dimensão da peça, mais lento é o seu arrefecimento [44].

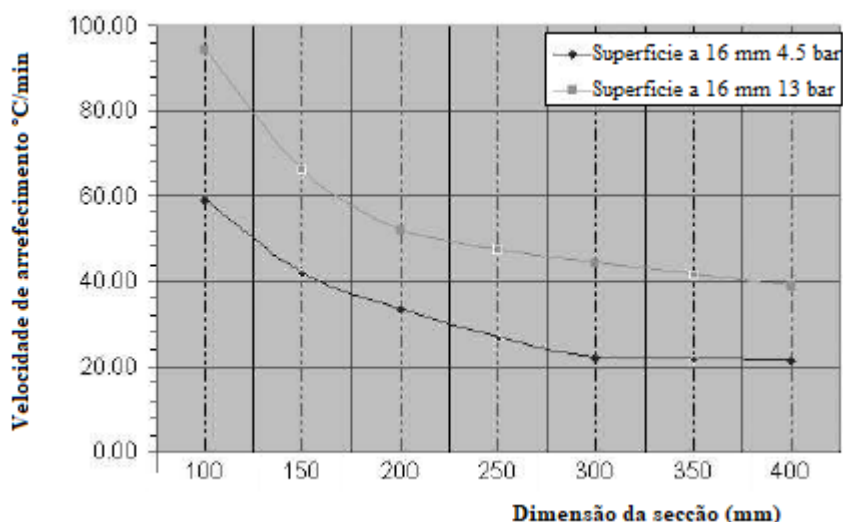


Figura 28 – Influência da pressão na velocidade de arrefecimento para peças com diferentes secções (adaptado de [44]).

A têmpera realizada a vácuo apresenta diversas vantagens quando comparada às realizadas tradicionalmente, como, por exemplo, a têmpera por chama (processo atualmente utilizado na produção das ferramentas de corte). Uma vantagem é o facto de proteger a ferramenta da formação de óxidos, nitretos e outras impurezas indesejadas, resultantes da reação a altas temperaturas da peça com substâncias comuns presentes na atmosfera, como poeiras microscópicas, água, bactérias e vapores químicos. Quando não se utiliza uma atmosfera com agente redutor, isso é possível devido à pressão instalada no interior do forno, promovendo a dissociação desses compostos, evitando as reações químicas entre a peça e a atmosfera. Além do fenómeno de oxidação mencionado anteriormente, também permite

proteger do fenómeno de variação de teor em carbono, o que representa uma vantagem, dado que quando se dão esses fenómenos, podem gerar-se pontos frágeis nas ferramentas, ou as propriedades mecânicas das mesmas podem ser prejudicadas [43]–[46].

2.4.2 Tratamentos para reduzir o desgaste das ferramentas

O aumento da vida das ferramentas é algo importante, pois pode influenciar a produtividade de diversas indústrias. Como se trata de um tema relevante em diversas áreas, este está em constante estudo, sendo que na literatura surgem diversos métodos de aumentar a resistência ao desgaste das ferramentas.

2.4.2.1 Nitruração

A nitruração é um processo termoquímico, utilizado para melhorar propriedades da superfície de ferramentas. Este processo resulta numa melhor resistência à abrasão e fadiga, além do aumento de dureza dos aços. As peças nitruradas apresentam uma baixa distorção, uma vez que o processo é feito abaixo da temperatura de transformação de fase [47].

A nitruração pode ser realizada sob plasma, atmosfera gasosa ou em meio líquido. Esta consiste na formação de uma camada de nitretos à superfície da ferramenta resultando numa grande dureza superficial.

Existem vários aspetos que influenciam o processo de nitruração, sendo os mais importantes os seguintes:

- A temperatura à qual ocorre. Geralmente compreendida entre 500 e 570 °C, dependendo do método [48].
- A composição química do material a nitrurar. Qualquer aço pode ser nitrurado, mas apenas os que apresentam na sua composição elementos formadores de nitretos (Cr, V, Mo, etc.), é que vão apresentar durezas superficiais máximas. Os aços com teores mais baixos de elementos formadores de nitretos, vão sofrer apenas um ligeiro aumento de dureza, sendo este fenómeno designado por nitruração macia [48].
- O tempo do processo. É definido com base na camada nitrurada pretendida, sendo que para o processo em atmosfera gasosa, quanto mais demorado for o processo, maior será a espessura da camada nitrurada [48].
- A quantidade de azoto disponível. No caso da nitruração em atmosfera gasosa, associam essa quantidade ao potencial de nitruração (K_N). Este é calculado

medindo a quantidade de hidrogénio presente no forno, proveniente da reação de separação da amónia (fonte de azoto utilizada de forma mais comum).

2.4.3 Revestimentos

A utilização de revestimentos em ferramentas, de modo a reduzir o desgaste e aumentar o tempo útil das mesmas, tem sido objeto de estudo, sendo cada vez mais recorrente. Neste subcapítulo, encontram-se alguns dos revestimentos anti-desgaste existentes [49].

2.4.3.1 PTFE

O PTFE é utilizado como revestimento em instrumentos de diversas áreas, desde a culinária até à tribologia. A grande utilização deste tipo de revestimento deve-se a características como[50], [51]:

- Resistência a uma ampla gama de temperaturas (até 290° C);
- Anti-aderência;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Resistência à corrosão.

O PTFE é por vezes combinado com aditivos, como, por exemplo, resinas, de forma a obter melhores propriedades tribológicas e mecânicas, conferindo às ferramentas melhor comportamento sob fricção durante o funcionamento, e promovendo desse modo a resistência ao desgaste [52].

Para efetuar o revestimento numa ferramenta, esta necessita de ser previamente preparada, de modo a conferir uma maior adesão e, consequentemente, uma maior durabilidade. Inicia-se a limpeza com um jato de partículas abrasivas, removendo gorduras e poeiras que se encontrem na superfície da ferramenta. Após essa etapa, a aplicação do revestimento em PTFE pode ser feito de várias formas, entre elas [51]:

- Revestimento por Spray. Através de uma pistola de pintura, são projetadas pequenas partículas de revestimento, formando um filme com um acabamento suave. Este é o método mais simples, apresentando bons acabamentos, e sendo por isso largamente usado;
- Revestimento eletroestático. Este método funciona de forma similar ao revestimento por spray convencional. A diferença reside na pistola de pintura. Esta, através de um elétrodo, carrega negativamente as partículas do revestimento. Uma vez que a ferramenta a revestir se encontra eletricamente

neutra, as partículas aderem melhor à superfície. Esta forma de revestimento apresenta dificuldades em revestir superfícies com geometrias mais complexas.

2.4.3.2 PVD

O PVD é um processo de revestimento de superfícies que recorre a uma câmara sujeita a vácuo. Nessa, é colocado um ou mais materiais (designados por alvo) que servirão de matéria-prima para o revestimento. Dentro do processo PVD, existem duas formas de acelerar as partículas do material do alvo, em direção ao substrato: projeção catódica (*sputtering*) e evaporação [53], [54].

O método de evaporação consiste em aquecer o material, até que este atinja a fase de vapor, facilitado pelas baixas pressões existentes dentro da câmara. Posteriormente, as partículas gasosas do material descrevem uma trajetória até ao substrato (material a revestir), onde condensam, produzindo um filme de revestimento [54].

A projeção catódica é um processo de vaporização não térmico. O material do alvo é bombardeado por partículas de tamanho atômico (geralmente iões de um material gasoso), resultando na ionização de partículas. Estas partículas ejetadas são depositadas na peça a revestir [54].

Estes revestimentos estão associados a aplicações de resistência ao desgaste, constituídos por diversos compostos, entre os quais: TiN, (Ti–Al)N, Ti(C–N), CrN, Al₂O₃, TiB₂ [54]. Dos vários tipos de arquiteturas de revestimentos, salientam-se:

- Monocamadas, onde a morfologia, tamanho de grão e estrutura são afetados pelos parâmetros do processo, refletindo-se nas propriedades da camada.
- Multicamadas, compostas por dois ou mais materiais, alternados de forma periódica.
- Nanocompósitos, compostos por duas fases imiscíveis: duas nanocristalinas ou uma nano cristalina e uma amorfa.
- *Superlattice*, revestimentos compostos por camadas múltiplas com uma espessura na ordem dos nanómetros.

2.4.4 Carbonetos Sinterizados

Os carbonetos cementados são, nos dias de hoje, largamente utilizados em aplicações como ferramentas de corte, devido a características como elevada dureza e resistência ao desgaste. Estes são usualmente compostos por carbonetos e um ligante. De uma maneira geral, os carbonetos mais utilizados são os carbonetos de tungsténio (WC), titânio (TiC), tântalo (TaC) e nióbio (NbC), mas existem outros carbonetos como os carbonetos de zircónio (ZrC), de boro (BC) ou de silício (SiC). Este último, a par do TiC, é utilizado em materiais aos quais se dá a designação de *cermets*. Já o aglomerante mais utilizado é o cobalto (Co), uma vez que é normalmente usado para ferramentas com WC, enquanto que para os TiC é utilizado o Níquel (Ni). O carboneto cementado mais importante é o de tungsténio, sendo que nesta categoria também se consideram os que são formados por WC, TiC e TaC numa matriz de Co [55]–[57].

Tabela 18 - Valores de dureza e tenacidade de alguns carbonetos [58].

Material	Dureza (HV)	Tenacidade (MPa.m ^{0.5})
WC	3100-3600	7.4-9
TiC	2500-3200	2.3-2.8
TaC	1300-2400	2-3
NbC	2280-2520	2-3

Existem diferentes aspetos nos carbonetos cementados que influenciam as propriedades mecânicas. Além do tipo de carboneto utilizado, o tamanho de grão deste, é uma das características mais importantes e que mais afeta as propriedades mecânicas. Este pode variar entre 0.2 e 10 μm , sendo dividido em várias categorias consoante os tamanhos, podendo diferir ligeiramente segundo diferentes autores. Uma divisão de categorias possível é a seguinte [56], [59]:

- microgrãos para grãos com tamanhos inferiores a 0.8 μm ;
- grãos finos para grãos com tamanhos compreendidos entre 0.8 e 1 μm ;
- grãos medianos para grãos com tamanhos entre 1 e 4 μm e
- grãos grosseiros para grãos superiores a 4 μm .

A maior influência do tamanho do grão reflete-se na dureza da ferramenta, assim, para ferramentas que contêm grãos mais finos, esta tende a apresentar uma maior dureza, o que é perceptível na Figura 29.

A quantidade de aglomerante influencia fundamentalmente a tenacidade do produto, obtendo-se para maiores quantidades de aglomerante um produto com maior tenacidade, condicionando em contrapartida a dureza, como se pode verificar na Figura 30. A quantidade de aglomerante varia normalmente entre 3 e 20 %, dependendo da combinação pretendida entre a tenacidade e a dureza [56].

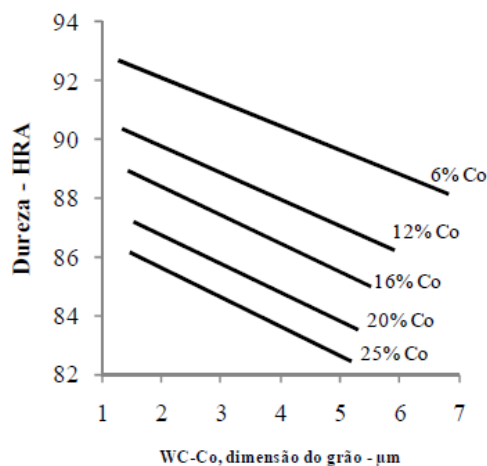


Figura 29 - Influência da quantidade de Co e da dimensão do grão de WC na dureza do carboneto cementado (adaptado de [60]).

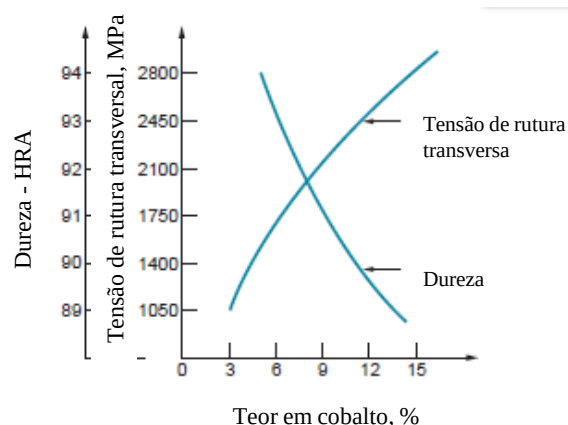


Figura 30 - Variação da dureza e da tensão de rotura em função do teor em Co (adaptado de [55]).

À semelhança de outros materiais, quando sujeitos a uma aplicação em que a resistência ao desgaste é fulcral, as propriedades mecânicas, assim como a microestrutura e o meio envolvente são importantes, sendo a dureza uma das mais preponderantes. Na Figura 31 vê-se que a tenacidade do material (K_{IC}) evolui de forma contrária à dureza e, por sua, vez à

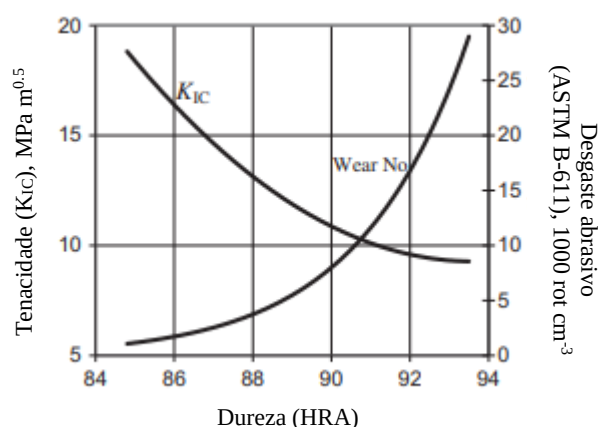


Figura 31 - Tenacidade e resistência ao desgaste em função da dureza para pastilhas WC-Co (adaptado de [59]).

3 Procedimento experimental

Numa primeira fase, procedeu-se à procura de possíveis melhorias para a ferramenta. Para isso, além da análise da ferramenta atualmente utilizada, recolheram-se opiniões junto dos operadores, uma vez que estes estão mais familiarizados com esta. Neste processo, compreendeu-se que além da fraca durabilidade, o seu uso contínuo provoca lesões, sendo as mais comuns no ombro, pulso e costas, assim como calos e deformações nas mãos. Alguns operadores utilizam pegas improvisadas, de forma a tornar o seu manuseamento mais confortável durante o trabalho. Conclui-se então que a ferramenta é pouco ergonómica.

Decidiu-se, com base no referido anteriormente, efetuar o estudo de vários materiais para a lâmina de corte, bem como desenvolver um conceito de ferramenta que permita uma maior ergonomia. Para isso, desenvolveu-se um trabalho experimental dividido em várias etapas.

No capítulo 3.2 são apresentados os materiais utilizados. De seguida, no capítulo 3.3, estão descritas as metodologias utilizadas nas diversas análises e ensaios realizados. No capítulo 4 encontram-se os resultados obtidos nos distintos ensaios/análises, bem como a sua discussão. No capítulo 5 contempla-se uma análise da viabilidade económica da alteração do material da ferramenta, enquanto que no capítulo 6 é exposto o processo de otimização da ferramenta.

Estas etapas encontram-se representadas na Figura 32.

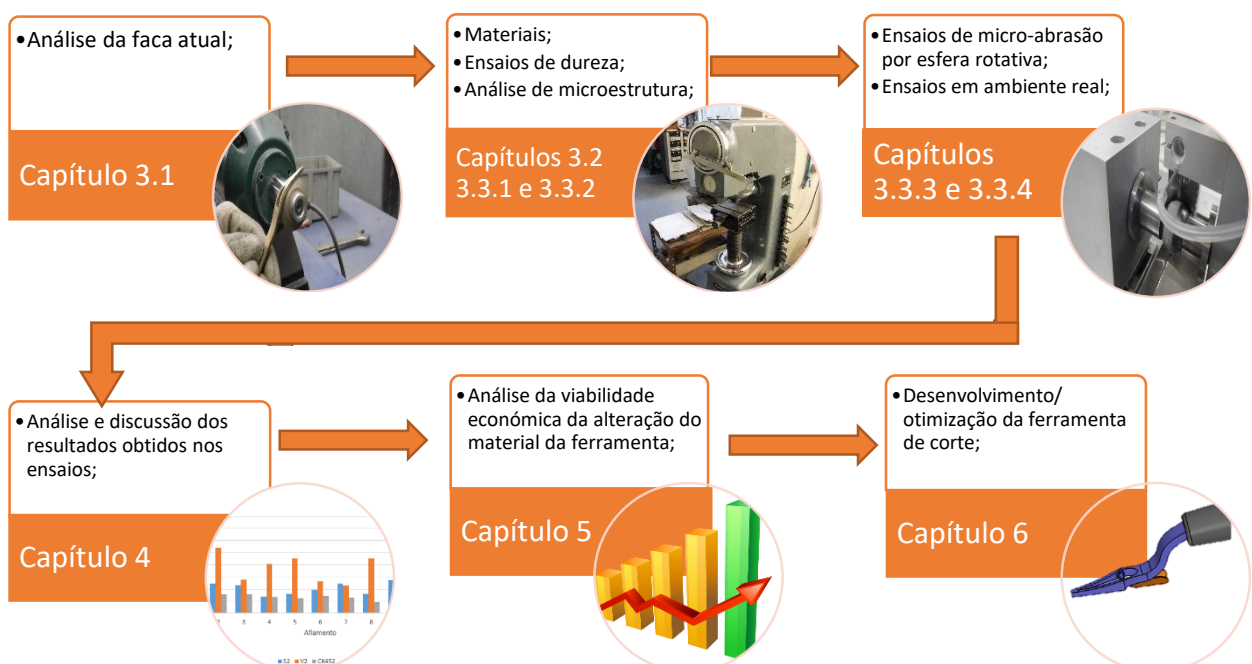


Figura 32 - Etapas do trabalho experimental realizado.

3.1 Análise da ferramenta atual

Este capítulo surge com o intuito de caracterizar as ferramentas de corte utilizadas atualmente na empresa. Para isso, elaborou-se um estudo acerca destas, que envolveu a análise do seu processo de fabrico e ainda uma breve análise do material utilizado na sua produção. Este foi um aspeto muito importante, pois permitiu compreender e definir possíveis melhorias na ferramenta de corte.

Uma vez que a ferramenta não era produzida na Continental, realizou-se uma visita à empresa responsável pela sua produção. Esta visita permitiu elaborar uma análise detalhada do processo de fabrico da ferramenta. Este envolve diversas etapas, sendo a primeira, a aquisição da chapa de aço F10 (DIN: CK 45, AISI 1045) com 3 mm de espessura e com uma dureza de cerca de 207 HB. Na Tabela 19 observa-se a composição química do aço segundo o catálogo do fornecedor, enquanto que na Tabela 20 se encontram os valores da composição química desse aço, segundo a norma.

Tabela 19 - Composição química segundo o fornecedor [61].

	%C	%Si	%Mn	%P	%S
Composição química	0.42-0.5	<0,035	0,5-0,8	≤0,35	<0,035

Tabela 20 - Norma da composição química do aço AISI 1045.

	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cr+Mo+Ni
Composição Química	0,42-0,50	≤0,4	0,5-0,8	<0,035	<0,035	≤0,4	≤0,1	≤0,4	≤0,63

O segundo passo consiste em obter uma peça com o formato igual ao representado na imagem a) da Figura 33, através de um punção e de uma matriz.

De seguida, recorrendo a um esmeril, remove-se as rebarbas geradas na operação anterior. Nesta etapa, remove-se também a carepa presente na zona funcional da peça, de forma a melhorar o comportamento na têmpera. No final desta etapa, a ferramenta apresenta o aspeto semelhante ao da ferramenta b) da Figura 33.

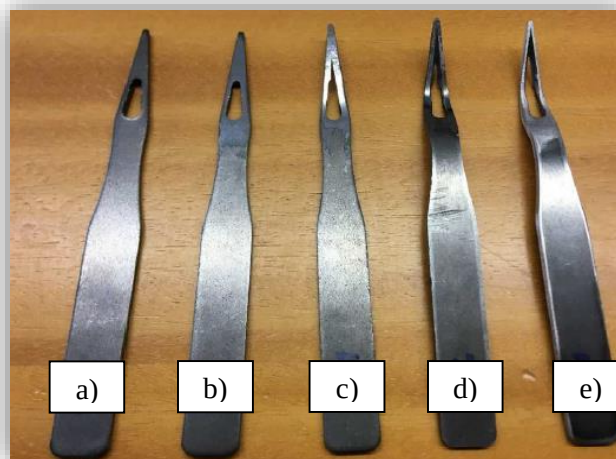


Figura 33 - Aspeto das ferramentas nas distintas etapas de produção.

A etapa que se segue trata-se de abrir o rasgo da zona de corte (imagem c)), através de uma fresa de carboneto de tungsténio em forma de cunha. Para isso, é conferida uma ligeira curvatura na ferramenta, para que esta fique bem presa na matriz que a segura ao longo do processo. De referir que a fresa é retificada após o processamento de aproximadamente 20-25 ferramentas.

Posteriormente, a ferramenta é conformada plasticamente, através de uma prensa e de uma matriz, obtendo a forma pretendida, representada na figura d), O passo seguinte é o tratamento térmico, mais concretamente têmpera em água. A empresa dispõe de três operadores distintos, os quais realizam esta tarefa. O método que se utiliza na têmpera consiste em aquecer um grupo de ferramentas (3 a 5) dispostas em forma de leque, através de uma chama oxiacetilénica, até que estas se apresentem cor de laranja, sendo após isso mergulhadas em água.

A etapa final deste processo, consiste em afiar de forma manual a lâmina da ferramenta. Para isso, é utilizada uma mó redonda em forma de cunha, em aço com partículas de diamante. Esta entra pela parte superior da ferramenta, como se pode observar na imagem a) da Figura 34. De seguida, utiliza-se uma pedra de esmeril plana para facejar a face inferior da ferramenta, de acordo com a imagem b) da Figura 34. Durante as sucessivas utilizações da mó e esmeril, a ferramenta é mergulhada em água para não aquecer. O processo encontra-se concluído quando a ferramenta cortar papel na perfeição.

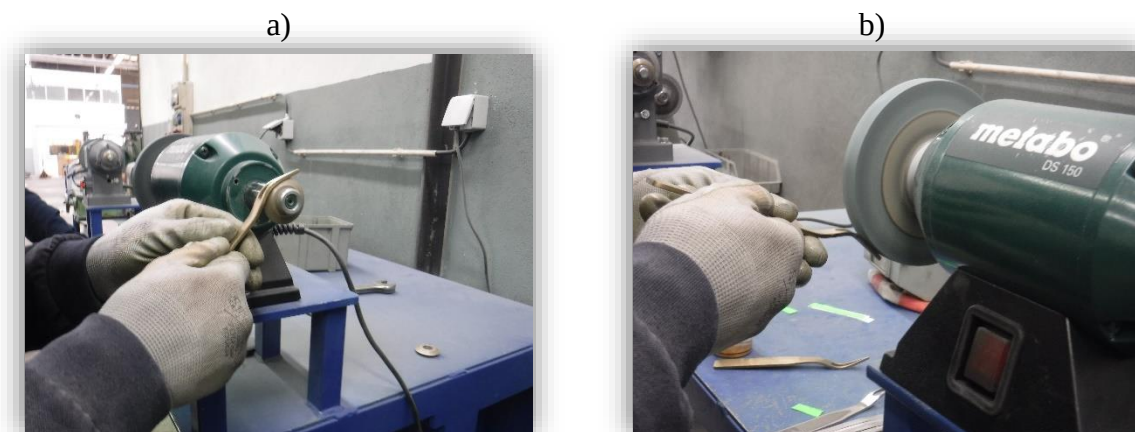


Figura 34 - Processo de afiamento na produção da ferramenta.

Para a análise do material, foram utilizadas duas ferramentas fornecidas pela Continental, uma desgastada (D) e outra nova (N), onde se utilizaram amostras retiradas das zonas da lâmina (L) e do cabo (C). Foi também utilizada uma ferramenta fornecida durante a visita (V), referente ao processo de fabrico pela empresa responsável pela produção das facas.

Foram preparadas amostras das ferramentas N e D das zonas L e C, de modo a poder estudar a microestrutura, dureza e composição química destas. Na Figura 35 observa-se a zona de onde foram retiradas as amostras.

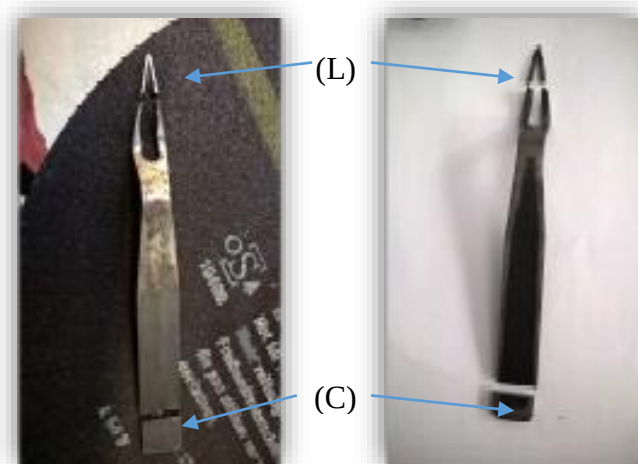


Figura 35 - Zonas das amostras analisadas.

Todas as amostras foram preparadas utilizando uma sequência de lixas de SiC com 80, 320, 600 e 1200 mesh. De seguida, foram polidas utilizando panos (3 e 1 μm) com uma suspensão de diamante.

Foram registradas imagens das amostras antes e após o ataque químico (Nital 2%), utilizando o microscópio ótico Olympus PMG 3 com sistema de aquisição de imagens Olympus DP12. Verifica-se (Figura 36 e Figura 38) que a ferramenta nova apresenta muito poucas inclusões, embora se observe uma fissura na zona da lâmina (NL). Quanto à microestrutura, foi observada na zona da lâmina uma estrutura martensítica (Figura 37), como era de esperar, devido ao tratamento térmico efetuado. Na Figura 39, vê-se a zona do cabo (NC), onde foi observada uma estrutura normalizada constituída por ferrite e perlite.

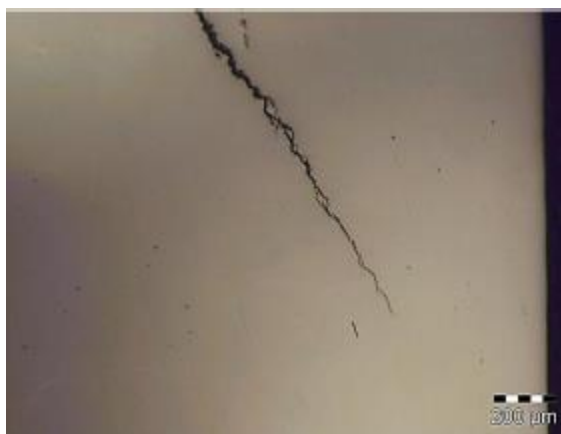


Figura 36 - Amostra NL antes do ataque químico.



Figura 37 - Amostra NL após o ataque químico. Nital 2%



Figura 38 - Amostra NC antes do ataque químico



Figura 39 - Amostra NC após o ataque químico. Nital 2%

De igual forma, foi analisada a ferramenta desgastada, não se observando diferenças relevantes face ao que foi observado na ferramenta nova. Observa-se então que o material apresenta poucas inclusões (Figura 40 e Figura 42). Na Figura 41 observa-se uma estrutura

martensítica, enquanto na Figura 43, à semelhança da amostra anterior, se observa uma estrutura normalizada constituída por ferrite e perlite.



Figura 40 - Amostra DL antes do ataque químico.



Figura 41 - Amostra DL após o ataque químico. Nital 2%



Figura 42 - Amostra DC antes do ataque químico.



Figura 43 - Amostra DC após o ataque químico. Nital 2%

Efetuuou-se uma análise à composição química das três amostras, utilizando o espectrômetro de emissão ótica Spectro Max X, onde se verificou que nas amostras N e D, a quantidade de carbono se encontra ligeiramente abaixo do que se encontra especificado, quer pela composição fornecida pelo fabricante (Tabela 19), quer pela norma AISI (Tabela 20). Os restantes elementos encontram-se todos dentro dos limites estabelecidos. Quanto à ferramenta V, verifica-se que todos os elementos se encontram dentro dos limites. Os resultados da análise à composição química encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados da análise da composição química à ferramenta nova (N), desgastada (D) e da visita à empresa (V).

Amostra	Composição química (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
N	0.39	0.16	0.63	0.01	0.004	0.22	0.009	0.04	0.03
D	0.38	0.21	0.66	0.02	0.005	0.25	0.003	0.02	0.03
V	0.45	0.16	0.67	0.02	0.005	0.23	0.003	0.02	0.03
	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Fe	
N	0.05	<0.001	0.002	<0.005	<0.005	0.01	<0.01	98.4	
D	0.02	<0.002	0.002	<0.005	<0.005	0.007	<0.009	98.3	
V	0.02	<0.002	0.002	0.01	<0.005	0.01	<0.01	98.3	

De seguida, procedeu-se à análise da dureza das ferramentas na zona do cabo e na zona da lâmina. Na zona do cabo, foram efetuados ensaios de dureza Vickers com cargas de 40 e 20 kgf, obtendo-se valores médios de 210 HB. Estes valores vão de encontro ao esperado uma vez que, segundo o catálogo do fornecedor, a dureza no estado fornecido deste aço é de cerca de 207 HB.

Na zona da lâmina, sujeita a tratamento térmico, registaram-se valores de dureza indicados na

Tabela 22. Observando esses valores, é de notar que existe alguma variação de dureza nas ferramentas (57-64 HRC). Um dos motivos para isso acontecer pode estar relacionado com o processo de têmpera, que como já foi referido anteriormente, é controlado pela cor que a ferramenta atinge a altas temperaturas. Sendo este processo dependente da destreza do operador que a realiza, e sendo esta tarefa executada por distintos operadores, é natural que surjam ferramentas com durezas distintas, que podem ditar diferentes comportamentos aquando da sua utilização. A temperatura recomendada na austenitização do aço F10 encontra-se entre 820 e 860 °C, causando temperaturas inferiores o aparecimento de ferrite na matriz martensítica, levando a uma redução na dureza do produto final.

Tabela 22 - Durezas (HV e equivalente em HRC) da peça nova (N), desgastada (D) e da visita à empresa (V).

Amostra	Dureza (HV)		Dureza (HRC)	
N	724		61	
D	701	681	644	57-60
V	772	824		62-64

Um outro aspeto que pode dar origem a esta diferença de durezas obtidas está relacionado com a quantidade de carbono presente no lote de aço recebido. De acordo com a literatura, e como já foi visto, a percentagem de carbono está diretamente relacionada com a dureza do aço. No caso do aço F10, com 0.45% de C, pode apresentar uma dureza máxima de 63-64 HRC, enquanto que um com 0.4%, apenas apresenta 60 HRC [61]. Posto isto, uma vez que as ferramentas não estão sujeitas ao tratamento de revenido, as diferenças dos valores de dureza obtidas podem estar também relacionadas com a variabilidade da quantidade de carbono observada na análise da composição química referida anteriormente.

3.2 Materiais

Esta dissertação tem como objetivo, como já foi referido, otimizar a ferramenta de corte utilizada na zona de inspeção final na indústria de pneus, diminuindo os custos que lhe estão associados e melhorando também a ergonomia desta, de modo a evitar/reduzir possíveis lesões nos operadores. Assim, recorreu-se a uma análise de materiais distintos, de modo a seleccionar aquele que demonstre um melhor comportamento, em função também outros aspetos como o preço.

Com base na revisão bibliográfica, decidiu-se analisar dois aços ligados para trabalho a frio, de forma a avaliar as melhorias proporcionadas pela presença de carbonetos. Como a distribuição e a morfologia desses mesmos carbonetos estão relacionados com a resistência ao desgaste, optou-se por testar um aço produzido por pulverometalurgia e outro de forma convencional, nomeadamente o “Vanadis 8” e o “Sleipner”. Estas são as designações atribuídas pelo fornecedor.

Para além destes, numa fase inicial, decidiu-se estudar o comportamento de outro aço para trabalho a frio (AISI D2) e de três variantes do aço AISI 440C (Figura 44), um aço

inoxidável martensítico utilizado em facas de cozinha. Foram atribuídas designações para as diferentes amostras:

- 4116F, para a amostra no estado forjado;
- 4116L, para a amostra no estado laminado;
- 411N, para a amostra com adição de azoto;

Para além destes aços, introduziu-se nos testes o aço AISI 1045, atualmente utilizado na produção das ferramentas de corte.

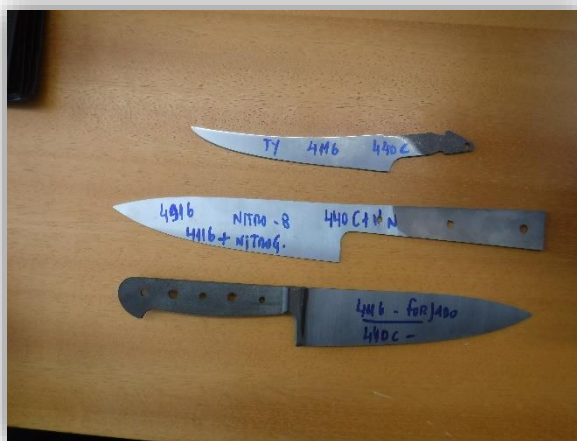


Figura 44 - Diferentes tipos de amostra do aço AISI 440C.

Algumas designações destes aços encontram-se na Tabela 23, e as respetivas composições químicas na Tabela 24.

Tabela 23 - Designações dos aços utilizados segundo algumas normas[61], [62].

AISI	W-Nr Standard	DIN	Ramada
440C	1.4125	X105CrMo17	-
-	-	-	Sleipner
-	-	-	Vanadis 8
1045	1.1191/1.1730	C45E	F10
D2	1.2379	X155CrVMo 12-1	C265

Tabela 24 - Composição química dos aços (%) [61], [62].

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P(max)	S(max)
“Vanadis 8”	2.3	0.4	0.4	4.8	3.6	8.0	-	-
“Sleipner”	0.8-1	0.7-1.1	0.25-0.6	7-8.5	2.3-2.8	0.4-0.6	-	-
AISI 1045	0.42-0.5	0.4 max	0.5-0.8	-	-	-	0.035	0.035
440 C	0.95-1.20	1 max	1 max	16-18	0.75 max	-	0.04	0.03
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

Foram efetuados tratamentos térmicos nas amostras do aço “Vanadis 8”, “Sleipner” e D2. A Figura 45 mostra as várias fases dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido efetuados nestas amostras. As curvas CCT (*Constant Cooling Transformation*) e os diagramas de revenido encontram-se no anexo A. A ausência dos patamares de aquecimento deve-se à ausência de informação disponibilizada pela empresa onde se realizaram os tratamentos.

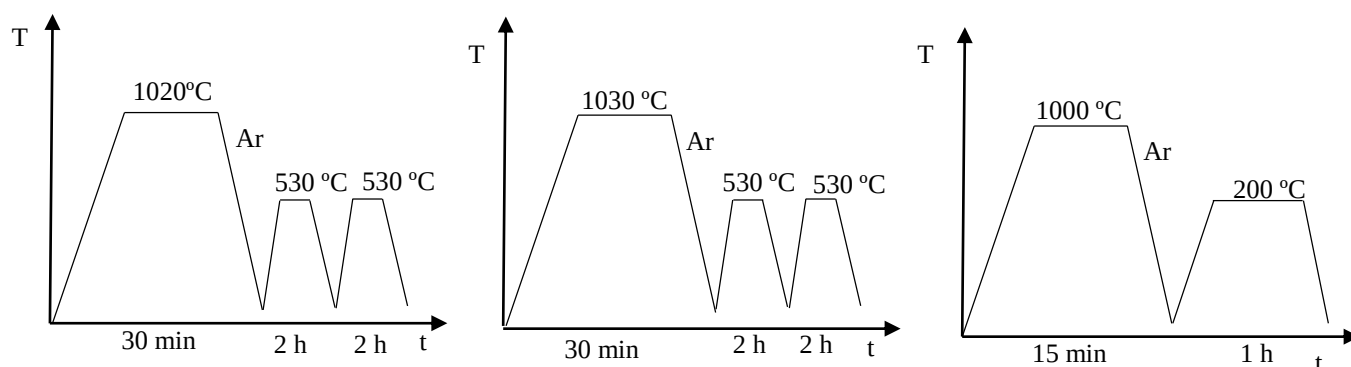


Figura 45 - Tratamentos térmicos de têmpera e revenido efetuados. a) “Vanadis 8”; b) “Sleipner”; c) D2.

As amostras utilizadas para os ensaios de desgaste e na análise da microestrutura foram cortadas utilizando uma máquina de corte TR60 da Remet (Figura 46) presente no laboratório de metalografia do DEMec, obtendo amostras com dimensões aceitáveis para o efeito.



Figura 46 - Máquina de corte TR60 de Remet.

Note-se que as designações dos materiais usados nos capítulos seguintes são: “Vanadis 8”, “Sleipner”, “C45E”, “C265”, “4116F”, “4116L”, “4116N”.

3.3 Procedimentos

3.3.1 Ensaio de dureza

Os testes de dureza realizados têm como finalidade caracterizar de melhor forma o material, uma vez que esta está diretamente relacionada com a resistência ao desgaste, que é uma propriedade importante no que toca ao desempenho das ferramentas em questão neste trabalho.

Os ensaios de dureza, nas amostras submetidas a tratamentos térmicos, foram realizados segundo a escala *Rockwel C*. Por outro lado, as durezas das amostras no estado fornecido (recozido), foram registadas segundo a escala *Brinell*, utilizando uma esfera de 2 milímetros de diâmetro e uma carga de 187.5 kg. Foram efetuadas três medições em cada amostra, de modo a minimizar possíveis erros, recorrendo ao equipamento *Dia Testor 2 RC* (Figura 47) presente no laboratório de ensaios tecnológicos do DEMec.



Figura 47 - Durómetro Dia Testor 2 RC presente no laboratório de ensaios tecnológicos do DEMec.

3.3.2 Análise da microestrutura

Para análise da microestrutura, as amostras de menor dimensão e de difícil manuseamento foram montadas numa resina Epomet, utilizando a máquina Prontopress-2 da Struers (Figura 50), presente no laboratório de metalografia do DEMec.

Após ter as amostras preparadas, estas foram desbastadas utilizando o equipamento RotoPol -21 da Struers (Figura 48). O desbaste foi assistido com água e efetuado à velocidade de 300 rotações por minuto. Foram utilizadas um conjunto de lixas abrasivas de carboneto de silício com granulações de 80, 180, 320 e 800 mesh, rodando a amostra 90° entre as diferentes lixas. Posteriormente, as amostras foram polidas com recurso ao equipamento DP-U4 da Struers (Figura 49) utilizando uma solução de alumina. De seguida, estas foram polidas num pano com abrasivos de diamante (3 e 1 μm), de modo a garantir um acabamento espelhado idêntico para todas elas, utilizando um equipamento semelhante ao usado no processo de lixagem com uma velocidade de 150 rotações por minuto. É de referir a importância da limpeza e secagem entre as etapas, de modo a não contaminar as diferentes lixas com grãos e impurezas das lixas utilizadas previamente.

Finalmente, realizou-se o ataque químico da superfície, para que seja possível visualizar as distintas fases do material pela reflexão da luz no microscópio ótico. O ataque químico consiste em mergulhar a amostra no reagente até que a superfície deste apresente uma superfície baça. Para que o reagente não ataque excessivamente a amostra, no fim do ataque, é necessário proceder à sua limpeza. Na Tabela 25 é apresentado o tipo de reagente utilizado para cada amostra, assim como a duração do ataque.



Figura 48 - Equipamento RotoPol -21 da Struers, presente no laboratório de metalografia do DEMec

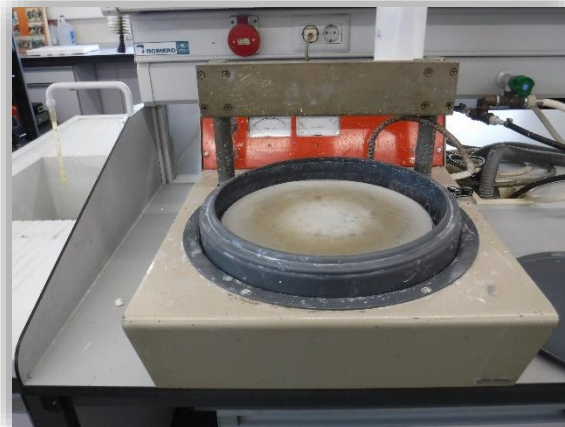


Figura 49 - DP-U4 da Struers, presente no laboratório de metalografia do DEMec.



Figura 50 - Máquina Prontopress-2 da Struers presente no laboratório de metalografia do DEMec.

Tabela 25 - Tipo de reagentes utilizados para cada material.

Material	Reagente
C45E	Nital (2%)
“Sleipner”	Picral
4116 N	Picral
4116 L	Picral
4116 F	Picral
“Vanadis 8”	Nital (2%)

Por fim, procedeu-se à aquisição de imagem das microestruturas das diversas amostras, através do microscópio ótico Axiophot da Zeiss.

3.3.3 Ensaio de micro-abrasão por esfera rotativa

Com o intuito de fazer uma previsão do comportamento dos materiais quando sujeitos à possível aplicação final, foram efetuados vários ensaios de desgaste abrasivo por esfera rotativa, de acordo com o procedimento B definido pelo NPL (National Physical Laboratory) [63]. Este ensaio consiste em fazer rodar uma esfera de rolamento (AISI 52100), contra a amostra em análise, na presença de uma mistura abrasiva que é constantemente depositada gota a gota na esfera como se pode ver na Figura 51 a). Para isso, utilizou-se o tribómetro TE 66 Micro-Scale Abrasion Tester da PLINT (Figura 51 b)), presente no CETRIB do INEGI.

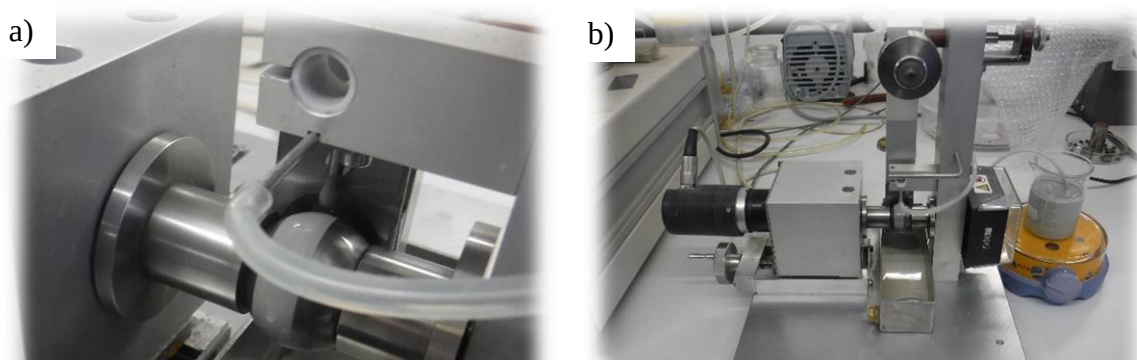


Figura 51 - Ensaio de micro-abrasão por esfera rotativa a) Pormenor da deposição de abrasivo; b) Tribómetro TE 66 Micro-Scale Abrasion Tester.

O equipamento teve de ser ajustado entre ensaios, para que a amostra apenas encostasse na esfera sem exercer força. Após isso, foram colocados os pesos pretendidos. Utilizou-se uma solução composta por pós de carboneto de silício com granulação de 1200 mesh e água destilada. Para utilizar uma esfera nova, esta teve de ser previamente atacada quimicamente com nital 2%, de modo a apresentar uma rugosidade capaz de transportar partículas abrasivas da solução. As condições utilizadas nos ensaios estão representadas na

Tabela 26.

Tabela 26 - Condições utilizadas nos ensaios de micro-abrasão por esfera rotativa.

Velocidade de rotação (rotações por minuto)	80
Força aplicada (N)	0.25
Mistura abrasiva (g/ 100 ml de água destilada)	35.4 (SiC)
Diâmetro da esfera (mm)	25

A rotação da esfera gera desgaste na amostra, com a forma de um calote esférica, sendo o volume desta calculado através da medição dos diâmetros em duas direções perpendiculares.

Essas medições foram efetuadas recorrendo ao mesmo microscópio utilizado na análise da microestrutura.

Com os valores desses diâmetros, calcula-se o volume desgastado, utilizando a seguinte fórmula:

$$V = \pi \frac{b^4}{64R} \quad (3.1)$$

Onde:

- V é o volume do calote resultante do desgaste (mm³);
- b é a média dos diâmetros medidos (mm);
- R é o raio da esfera utilizada (mm).

O coeficiente de desgaste é então obtido através da seguinte fórmula:

$$K_S = \frac{V}{SN} \quad (3.2)$$

Onde:

- V é o volume de desgaste (mm³);
- S é a distância de escorregamento percorrida pela esfera (mm);
- N é a força normal aplicada (N).

Foram realizados três ensaios distintos representados na Tabela 27. No primeiro foram testadas amostras de todos os materiais referidos em 3.1. Estes foram sujeitos a um mesmo acabamento superficial, correspondente à utilização de panos de polimento com suspensão de diamante. Foram efetuados cinco pontos de desgaste, correspondentes a 100, 200, 300, 500 e 700 rotações.

No segundo ensaio utilizou-se o mesmo tipo de amostras do ensaio 1, com um acabamento semelhante, efetuando três medições, para 500, 700 e 1500 rotações. Este foi realizado com o intuito de observar o comportamento dos materiais para um maior número de ciclos.

Uma vez que se entendeu que o número de ciclos dos ensaios anteriores não fora suficiente para reproduzir o tempo de funcionamento da ferramenta em estudo, decidiu-se fazer um terceiro ensaio. Neste, utilizaram-se apenas amostras dos aços C45E, “Vanadis 8”,

“Sleipner” e C265, com acabamento semelhante aos utilizados nos ensaios anteriores, diferindo nas medições, sendo estas feitas ao fim de 1 hora de ensaios (4800 rotações).

No início de cada ensaio, procedeu-se à limpeza ultrassónica durante 15 minutos com acetona de todas as amostras, usando o equipamento ATU Digital Ultrasonic Cleaner.

Tabela 27 - Acabamentos superficiais, número de rotações e materiais utilizados nos ensaios de micro-abrasão por esfera rotativa.

Ensaio	Acabamento superficial	Nº de rotações	Material testado
1	Lixas com suspensão de diamante	100, 200, 300, 500 e 700	“Sleipner”, “Vanadis 8”, C45E, 4116L, 4116F e 4116N, C265
2	Lixas com suspensão de diamante	500, 700 e 1500	“Sleipner”, “Vanadis 8”, C45E, 4116L, 4116F e 4116N, C265
3	Lixas com suspensão de diamante	4800	“Sleipner”, “Vanadis 8”, C45E, C265

3.3.4 Ensaios em ambiente real

Nesta secção são expostas as metodologias e materiais utilizados para realizar cada ensaio experimental.

3.3.4.1 Estudo do comportamento de diferentes materiais

Antes de explicar a metodologia aplicada neste processo, é importante referir qual é o procedimento utilizado pelos colaboradores num dia normal de trabalho. Estes, na sua generalidade, possuem um conjunto de ferramentas de corte (15-20), das quais usam uma até necessitar de ser afiada, permitindo esta a inspeção de, em média, 100 pneus (este valor é variável, consoante o colaborador). Quando esta ferramenta perde o poder de corte, o colaborador coloca-a de parte e começa a trabalhar com uma outra. O afiamento das ferramentas é efetuado quando nenhuma se encontra capaz de cortar, ou no final/ início do turno, dependendo do operador. O processo de afiamento e as dificuldades que os colaboradores sentem em relação a este, são explicados em 3.3.4.2.

Para realizar este ensaio, produziram-se a partir de material fornecido pela empresa Ramada, duas facas de cada tipo de material, nomeadamente “Sleipner” e “Vanadis 8”. A escolha destes materiais prende-se com o facto de se querer estudar a influência da presença e morfologia dos carbonetos, na resistência das ferramentas ao desgaste.

Estas foram produzidas com a mesma geometria das facas atualmente implementadas, de modo a reduzir a influência de fatores externos no manuseamento por parte dos operadores. Após obter a geometria pretendida, estas foram tratadas termicamente (têmpera a vácuo, segundo os ciclos representados em 3.2) na empresa Ramada, para terem uma dureza final entre 61-63 HRC. De seguida, procedeu-se ao afiamento da lâmina com o auxílio dos operadores e equipamentos presentes na empresa onde são produzidas as facas atualmente. Na Figura 52, estão representadas duas facas, sendo uma em “Vanadis 8” e outra em “Sleipner”. De forma a que fosse possível a distinção entre elas, fez-se uma pequena marca no cabo (Figura 53), sendo que as ferramentas com um ponto produzidas em “Sleipner”, com dois pontos “Vanadis 8” e sem nenhum em C45E.



Figura 52 - Exemplos das ferramentas produzidas. À esquerda em "Vanadis 8" e à direita em "Sleipner".

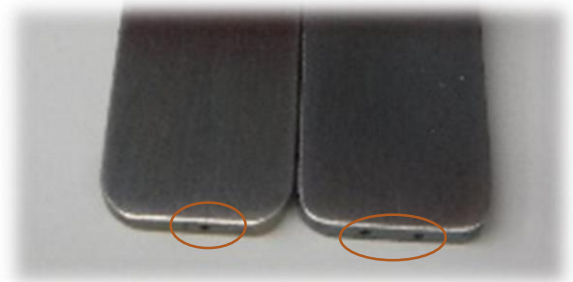


Figura 53 - Pormenor das marcas para distinção das ferramentas.

Na realização deste ensaio acompanharam-se dois turnos distintos. Em cada um dos turnos, os supervisores selecionaram dois operadores distintos, experientes nas tarefas de afiamento e inspeção de pneus. De modo a simplificar a explicação do método, designa-se por colaborador 1 o responsável pela inspeção de pneus usando a ferramenta, e por colaborador 2 o que procede ao afiamento das mesmas. Contou-se ao todo com a colaboração de quatro operadores, dos quais dois tinham a função do colaborador 1 e outros dois a função do colaborador 2.

O intuito de se ter um colaborador para cada tarefa é evitar que o comportamento que as facas têm ao ser afiadas, não influenciasse a opinião acerca destas e, consequentemente, o seu desempenho durante o processo de inspeção de pneus.

A metodologia adotada neste estudo do comportamento de distintos materiais, consistiu em registar o número de pneus inspecionados, à medida que as facas eram utilizadas pelo

colaborador 1. Para um registo de resultados mais controlado e rigoroso, este tinha em sua posse apenas uma das ferramentas de cada vez.

Após as três facas terem sido rejeitadas pelo colaborador 1, era-lhe pedido que inspecionasse um pneu com cada uma, para comparar se estas se encontravam com um poder de corte semelhante. Caso o colaborador 1 entendesse que isso não se verificava, este utilizava novamente as facas. Esta etapa visou reduzir as diferenças no estado das facas no momento da sua rejeição.

Posteriormente as três ferramentas eram entregues ao colaborador 2 para se proceder ao afiamento.

A ordem com que as ferramentas foram testadas foi aleatória, para que o colaborador não verificasse uma tendência nos resultados das facas. Na Figura 54 encontra-se um esquema representativo desta metodologia.

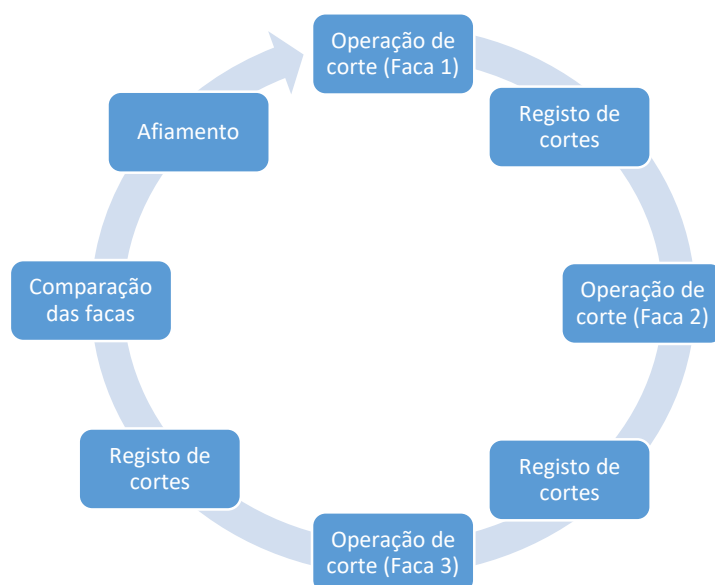


Figura 54 - Representação da metodologia adotada no estudo do comportamento de distintos materiais.

3.3.4.2 Estudo da influência do afiamento

Um aspeto relevante, é a dificuldade que os colaboradores encontram no processo de afiamento, visto que não possuem nenhum tipo de formação para afiar as ferramentas. A pouca experiência de alguns operadores, ou o uso impróprio do esmeril, levam a que, com o seu uso constante, as faces se tornem irregulares, dificultando o processo de afiamento. Tendo em conta que a qualidade do afiamento é um fator importante no desempenho da ferramenta, entendeu-se que este processo pode ser otimizado. Por esse motivo, em simultâneo (mesmas ferramentas) com o teste mencionado em 3.3.4.1, estudou-se a influência/relação entre o afiamento e o número de cortes que as facas efetuaram. Na Figura 55 pode-se ver um esquema de dois métodos distintos de afiamento.



Figura 55 - Representação de dois métodos de afiamento distintos utilizados.

Inicialmente, pensou-se em medir a variação da espessura após o afiamento, utilizando um micrómetro e, posteriormente, um perfilómetro (Gocator 2340 [64]), mas ambas as hipóteses se revelaram incapazes de efetuar as medições pretendidas. O método utilizado baseou-se em pesar as facas após cada afiamento. Através desta medição, torna-se possível aferir a variação do seu peso, e relacionar o mesmo com o volume desgastado no processo de afiamento das facas. As medições foram feitas recorrendo a uma balança com uma resolução de 0.001 g.

3.3.4.3 Estudo da influência da nitruração e revestimentos superficiais.

O último ensaio em ambiente real consistiu no estudo da influência da nitruração e vários revestimentos superficiais efetuados nas ferramentas. Para a realização deste, contou-se com a cooperação de dois colaboradores. A metodologia adotada foi semelhante à do ensaio descrito em 3.3.4.1, ou seja, procedeu-se ao registo do número de pneus inspecionado, à medida que cada faca era utilizada. O Colaborador 3, testou três tipos distintos de facas:

- Faca atualmente utilizada (C45E);
- Faca sujeita a um tratamento de nitruração (Nitrurada);

- Faca com revestimento anti-desgaste de fluoropolímeros (PTFE).

A nitruração foi efetuada segundo o tratamento AllNit, patenteado pela BMI. Este tratamento foi realizado a 540 °C, com uma pressão de 300 mbar, durante 5 horas.

O revestimento anti-desgaste utilizado foi o FLUOCOAT 01 da FLUPOL. Este tem como aplicações típicas, mecanismos que operam em ambientes agressivos, lâminas de corte, entre outros.

O Colaborador 4, para além dos três tipos de tratamentos testados pelo Colaborador 3, testou uma ferramenta em “Vanadis 8” com revestimento em PVD (revestimento PVD nanocompósito, baseado num sistema de nitreto de cromo e alumínio). A informação acerca deste revestimento encontra-se incompleta devido à ausência de informação disponibilizada pela empresa.

Nas Figura 56 pode-se observar as várias ferramentas utilizadas neste teste.



Figura 56 - Ferramentas utilizadas no estudo da influência da nitruração e revestimentos superficiais. a) C45E b) Nitrurada c) PTFE d) V+PVD.

4 Análise de resultados.

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

4.1 Ensaio de dureza

Na Tabela 28 observam-se os resultados dos ensaios de dureza efetuados.

Tabela 28 - Valores de dureza das distintas amostras.

Amostra	Medições (HRC)			Dureza média (HRC)
4116 F	50	52	53	≈52
4116 L	55	54	54	≈54
4116 N	53	54	54	≈54
C45E	59	60	60	≈60
“Sleipner”	59	60	60	≈60
“Vanadis8”	62	63	63	≈63
C265	63	64	64	≈64

Pode-se observar com base nos tratamentos térmicos efetuados (Figura 45) e nas curvas de CCT presentes no anexo A, que estes valores estão de acordo com o esperado, uma vez que são durezas típicas deste tipo de aços, no estado temperado e revenido.

Na Tabela 29 estão representados os valores de dureza dos aços “Sleipner” e “Vanadis 8” no estado fornecido.

Tabela 29 - Valores de dureza para as amostras "Sleipner" e "Vanadis 8" no estado fornecido.

Amostra	Medições (HB)			Dureza média (HB)
“Sleipner”	244	239	247	≈243
“Vanadis 8”	219	215	219	≈218

4.2 Análise da microestrutura

A análise da microestrutura, em conjunto com a medição da dureza do material, permite compreender e prever os resultados dos distintos testes realizados ao longo da presente dissertação.

Na Figura 57, Figura 58 e Figura 59 podem observar-se microestruturas do aço AISI 440 C. As diferenças observadas entre as duas primeiras podem estar relacionadas com o processo de produção do material das amostras, sendo que a primeira é forjada e a segunda laminada. Outro aspeto que pode justificar as diferenças observadas entre as microestruturas é o tratamento térmico, uma vez que também se obtiveram valores de dureza diferentes entre as amostras.

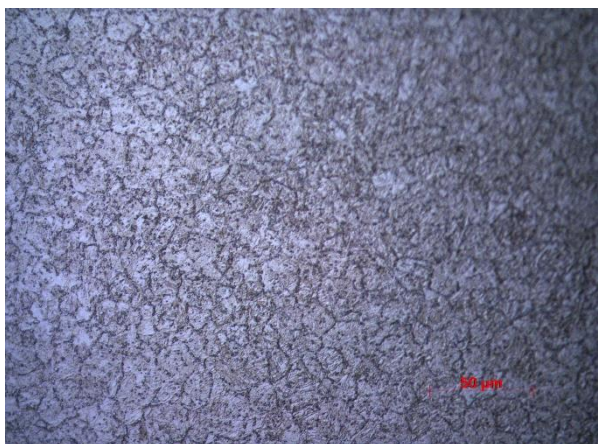


Figura 57-Amostra 4116 F, aço AISI 440 C. Picral. Microestrutura composta por carbonetos finos numa matriz martensítica revenida (52 HRC).



Figura 58- Amostra 4116 L, aço AISI 440C. Picral. Microestrutura é constituída por martensite revenida e carbonetos finos (54 HRC).

No caso da amostra 4116 N, para além das razões referidas anteriormente, a ligeira alteração na sua composição química (adição de azoto) pode estar na origem da obtenção de diferentes microestruturas. Nestas amostras, podem ver-se carbonetos finos numa matriz martensítica.

Na Figura 60 pode-se observar uma microestrutura do aço de construção AISI 1045 após uma têmpera em água. Verifica-se que esta é composta por uma estrutura martensítica.



Figura 59 - Amostra 4116 N, aço AISI 440 C (54 HRC) Picral. Microestrutura composta por martensite revenida e carbonetos finos

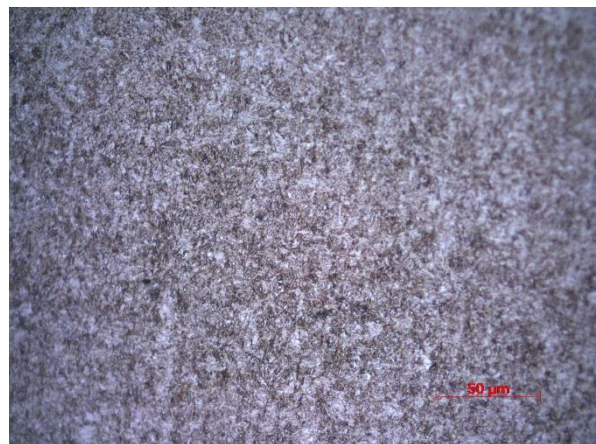


Figura 60 - Aço AISI 1045, Nital 2%. Na microestrutura pode ver-se essencialmente martensite (60 HRC) após uma têmpera em água

Nas Figura 61 e Figura 62 estão representadas as microestruturas do aço “Sleipner”, no estado recozido e após o tratamento térmico de têmpera e revenido, respectivamente. Nestas imagens pode ver-se a transformação da matriz ferrítica em martensítica, devido aos tratamentos térmicos. Um outro aspeto que se pode observar na imagem da amostra no estado recozido, é o tamanho irregular dos carbonetos. Além disso, também é visível uma distribuição pouco uniforme, observando-se alguns aglomerados de carbonetos grosseiros.



Figura 61 - Aço “Sleipner”, Picral. Microestrutura encontram-se carbonetos possivelmente de crómio, molibdénio e vanádio numa matriz ferrítica (243 HB).

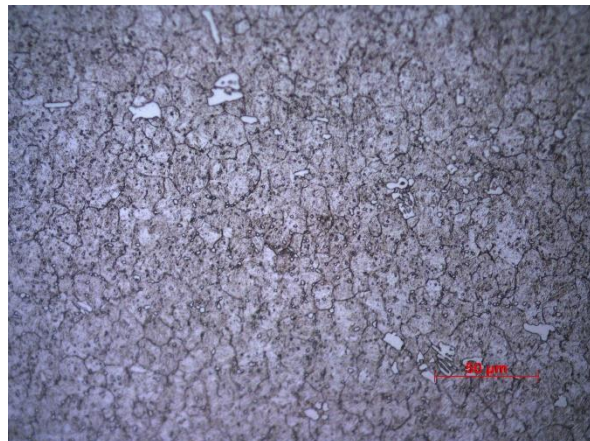


Figura 62 - Aço “Sleipner”. Picral. Microestrutura composta por uma matriz martensítica na qual se encontram carbonetos grosseiros e finos (60 HRC).

Nas Figura 63 e Figura 64 estão representadas as microestruturas do aço “Vanadis 8”, obtido pelo processo de pulverometalurgia. Estas imagens foram também obtidas com as amostras no estado recozido, e após o tratamento térmico de têmpera e revenido.

Novamente, pode-se observar diferenças entre as matrizes, uma vez que se deu uma transformação martensítica aquando do tratamento térmico. É de referir a presença de carbonetos muito finos e uniformemente distribuídos, estrutura típica de um aço obtido pelo processo de pulverometalurgia.



Figura 63 - Aço “Vanadis 8”. Nital 2%. Nesta microestrutura observam-se carbonetos finos distribuídos na matriz ferrítica (218 HB).



Figura 64 - Aço “Vanadis 8”. Nital 2%. Microestrutura composta por martensite com carbonetos finos e bem distribuídos (63 HRC).

Na Figura 65, observa-se a microestrutura do aço D2, obtida após o tratamento térmico de têmpera e revenido. Uma vez que o aço “Sleipner” surge de uma alteração do aço D2 [61], é natural que se encontrem semelhanças entre estas microestruturas. Assim, de forma análoga ao aço “Sleipner”, encontramos neste estado, uma matriz martensítica com a presença de carbonetos com formas e tamanhos irregulares e distribuídos de forma aleatória.



Figura 65- Aço AISI D2). Nital 2%. Microestrutura constituída por carbonetos finos e grosseiros numa matriz martensítica (64HRC).

Observaram-se três tipos distintos de materiais, nomeadamente:

- Um aço inoxidável martensítico (440 C);
- Aços de ferramentas (D2, “Sleipner” e “Vanadis 8”);
- Um aço de construção (AISI 1045).

É de salientar o facto de todas as amostras, à exceção do aço de construção, possuírem nas suas microestruturas carbonetos. Esse facto, em conjunto com o aspeto da morfologia e distribuição dos carbonetos nas restantes amostras, é especialmente importante para melhor entender os resultados obtidos nos restantes ensaios.

4.3 Ensaio de micro-abrasão por esfera rotativa

Os ensaios de micro-abrasão por esfera rotativa foram efetuados de modo a prever o comportamento dos materiais quando sujeito a esse mecanismo de desgaste. Na Figura 66 estão apresentados os valores de volume desgastado em mm^3 para todas as amostras com diferentes valores de rotação total da esfera. Pode-se observar que as amostras que demonstraram menores valores de volume de desgaste para o maior número de rotações, são as dos aços “Sleipner”, C265 e “Vanadis 8”, respectivamente. Por outro lado, a amostra que apresentou valores mais altos de desgaste foi a de C45E.

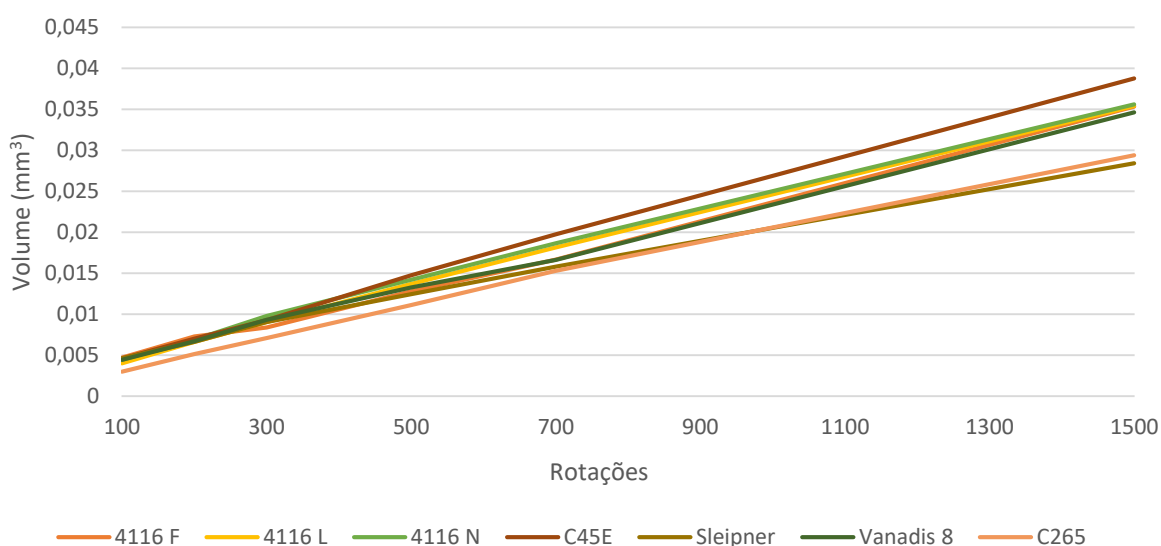


Figura 66- Volume desgastado em função do número de rotações para todas as amostras até as 1500 rotações.

Na Figura 67 observa-se, para as amostras que apresentam carbonetos na sua microestrutura, os volumes desgastados para 1500 rotações, em função da sua dureza. Verifica-se que os menores valores de desgaste correspondem às amostras nas quais se observam carbonetos com uma morfologia mais grosseira. Apesar de não ser perceptível uma relação evidente entre o aumento de dureza e o volume desgastado, o aumento de dureza parece resultar num menor desgaste nas amostras.

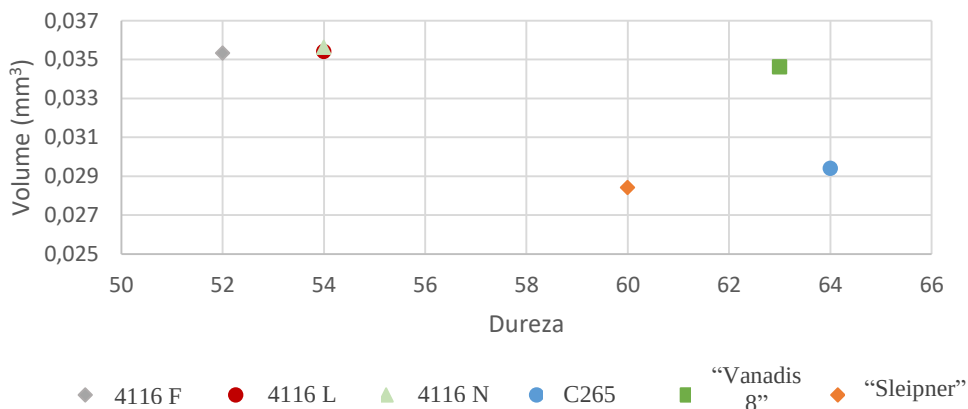


Figura 67 - Volume desgastado em função da dureza para amostras com presença de carbonetos para 1500 rotações.

Além da morfologia dos carbonetos, a presença destes acaba por estar relacionada com o desgaste uma vez que a amostra C45E (ausência de carbonetos), apesar de não ser a que apresentava valores de dureza mais baixos (60 HRC), foi a que apresentou um maior desgaste.

Apesar de apresentar uma dureza superior à amostra do aço “Sleipner”, a amostra do aço “Vanadis 8” demonstrou valores mais altos de desgaste. A composição química destes aços é diferente. O aço “Vanadis 8” é mais rico em vanádio, potenciando o aparecimento de mais carbonetos desse elemento, que como se viu em 2.4.1, são os que apresentam maior dureza. Desta forma, entende-se que não foi o tipo de carbonetos a originar a maior diferença no comportamento ao desgaste, mas sim a sua morfologia, uma vez que tanto as amostras dos aços “Sleipner” e C265 apresentam carbonetos grosseiros, ao invés da amostra de “Vanadis 8”, que apresenta carbonetos muito finos e bem distribuídos.

Na Figura 68 encontram-se os valores de volume desgastado em função do número de rotações da esfera, mas desta vez apenas para as amostras dos aços “Vanadis 8”, “Sleipner”, C265 e C45E, uma vez que os três primeiros foram os que mostraram melhor desempenho para a medição de 1500 rotações, e o C45E trata-se do material utilizado atualmente nas facas. Neste gráfico, pode-se observar uma medição adicional (4800 rotações) em relação à anterior. Nesta medição adicional, observa-se que os aços “Sleipner” e C265 continuam a revelar menor desgaste, sendo que o segundo apresenta um valor de desgaste ligeiramente menor em relação ao primeiro. No entanto, esperava-se uma maior resistência ao desgaste do aço “Vanadis 8”, em comparação com o aço C45E. Tal pode estar relacionado com o facto de este ensaio ter sido

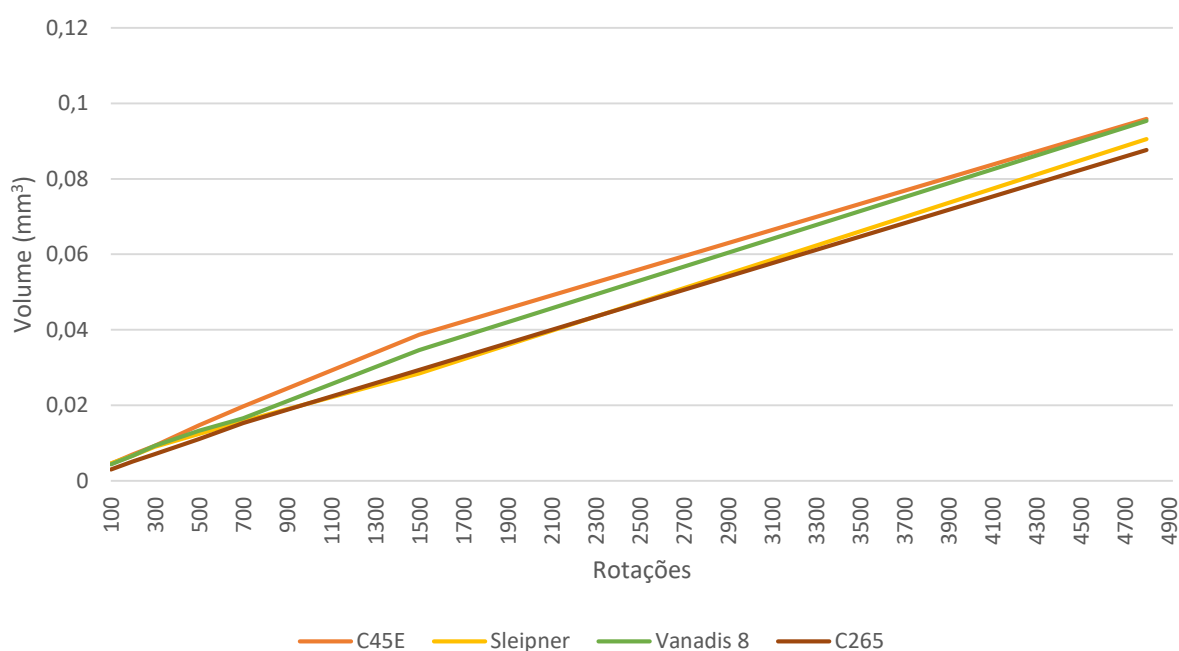


Figura 68 - Volume desgastado em função do número de rotações para as amostras C45E, “Sleipner”, “V8” e C265.

projetado para um pequeno número de rotações, perdendo-se sensibilidade à medida que o número de rotações aumenta.

Apesar de no capítulo 2 se referir que as microestruturas martensíticas com carbonetos finos e bem distribuídos, são as que apresentam melhor resistência ao desgaste, o mesmo não se verificou nos ensaios de micro-abrasão por esfera rotativa. Para este tipo de solicitações (simuladas pelo ensaio de micro-abrasão), microestruturas com carbonetos grosseiros revelaram-se melhores.

4.4 Ensaios em ambiente real

4.4.1 Estudo do comportamento de diferentes materiais

O primeiro teste em ambiente real consistiu em testar e comparar o comportamento de três aços distintos, da forma explicada no capítulo 3.3.4.1. Os resultados obtidos com o Colaborador 1 estão representados na Figura 69, onde se pode observar o número de pneus inspecionados (eixo das ordenadas) para cada afiamento (eixo das abcissas). Como se pode verificar, foram efetuados dez afiamentos nas respetivas facas, para além do afiamento zero (A0) correspondente à faca por utilizar (vinda de produção).

A ferramenta em “Vanadis 8” foi a que revelou melhores resultados, cortando em média aproximadamente 3.1 vezes mais pneus do que a ferramenta em C45E. A ferramenta em “Sleipner” não apresentou melhorias tão significativas como a anterior, cortando em média cerca de 1.52 vezes mais pneus que a ferramenta C45E, que foi a que apresentou piores resultados.

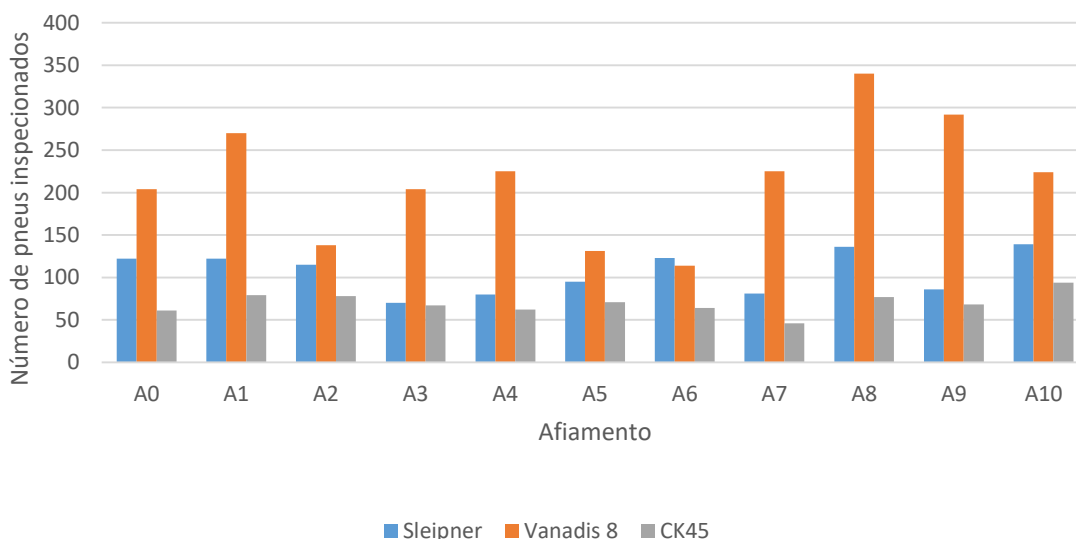


Figura 69- Resultados obtidos com o colaborador 1 no teste de comparação dos distintos materiais.

Os resultados obtidos com o Colaborador 2 encontram-se representados na Figura 70, e vão de encontro aos obtidos pelo Colaborador 1, uma vez que a ferramenta em “Vanadis 8” foi a que obteve o melhor desempenho e a de C45E o pior. Apesar disso, os rácios foram ligeiramente diferentes, inspecionando-se com a ferramenta em “Vanadis 8” cerca de 3.30 vezes mais pneus do que com a ferramenta em C45E. Já a ferramenta em “Sleipner” cortou apenas 1.23 vezes mais do que a ferramenta em C45E.

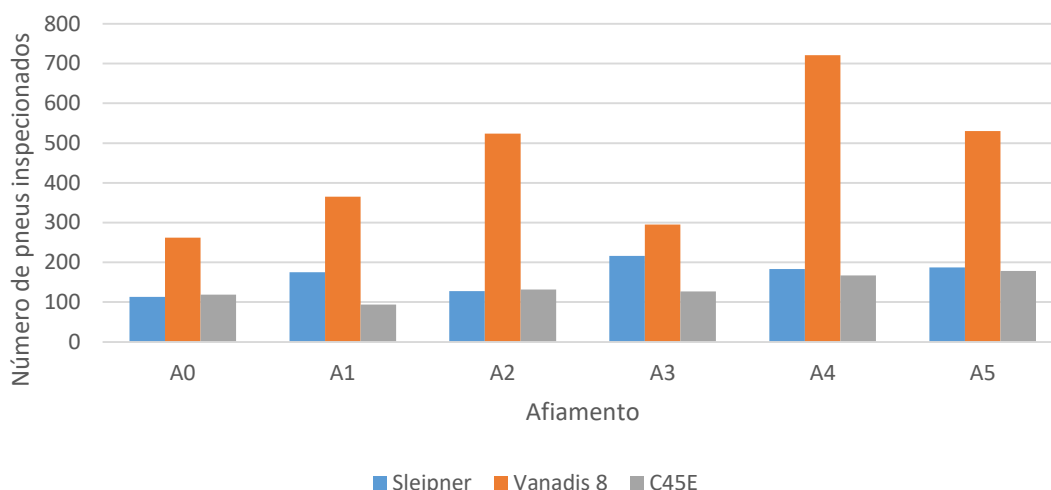


Figura 70- Resultados obtidos com o colaborador 2 no teste de comparação dos distintos materiais.

Como se pode verificar, neste teste apenas se efetuaram cinco afiamentos, em vez dos dez pretendidos. Isso deve-se ao facto da ferramenta em “Vanadis 8” se ter fraturado na zona da lâmina, no decorrer dos cortes, após o sexto afiamento. As fraturas nas ferramentas ocorrem, de forma geral, quando estas estão numa fase avançada da sua vida útil, apresentando uma espessura reduzida e tornando-se mais frágeis.

Não era previsto que ocorresse esta fratura, uma vez que:

- a ferramenta não se encontrava com uma espessura reduzida,
- a ferramenta foi submetida ao tratamento térmico de revenido que tem como um dos objetivos o alívio de tensões internas [61],
- a ferramenta foi afiada apenas após realizados os tratamentos térmicos,

Por estes motivos, a ferramenta foi analisada no Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP), com o intuito de identificar a causa da fratura. Foram registadas imagens da vista de cima e vista de baixo da fratura, recorrendo ao processo de microscopia eletrónica de varrimento (FEI Quanta 400FEG ESEN/EDAX Genesis X4M), representadas nas figuras Figura 71 e Figura 72. Nestas, ainda são visíveis fragmentos da borracha resultantes do corte de rebarba de pneu.

Além do registo de diversas imagens, foi efetuada uma microanálise por raios X (EDS) utilizando o mesmo equipamento, verificando a face lateral da ferramenta onde não se detetou nenhuma anomalia, encontrando-se os valores dentro dos limites pré-definidos. Os resultados desta análise estão presentes no anexo B. Contudo, de forma a tentar compreender melhor o fenómeno ocorrido, necessitar-se-ia de uma análise mais detalhada na zona da fratura, para entender se a mesma se deve às solicitações sofridas durante a operação de corte, devido a uso indevido da ferramenta (como por exemplo queda, impacto, etc.) ou mesmo a geração de uma fenda por fadiga na zona de maior concentração de tensões.

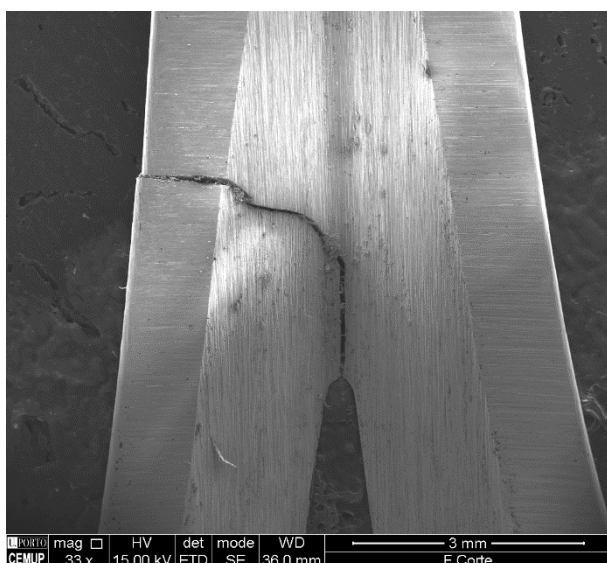


Figura 71 - Fratura visualizada a partir da face superior da faca.

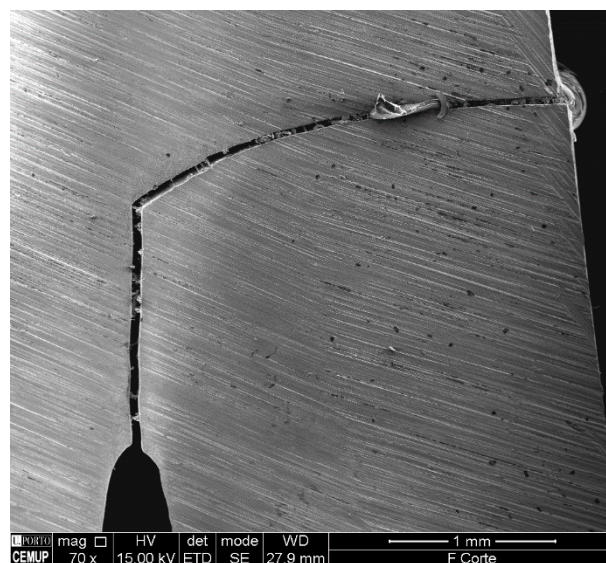


Figura 72 - Fratura visualizada a partir da face inferior da faca.

Entende-se que deveriam ter sido obtidas mais amostras para obter resultados mais fidedignos, algo que não foi possível realizar, tendo em conta o tempo e material disponível para este trabalho.

De salientar que os colaboradores apresentaram métodos de trabalhos diferentes. Enquanto o primeiro utiliza a ferramenta apenas até sentir que começa a exercer pressão no pulso, de forma a evitar lesões, o segundo utiliza-a até que praticamente perca o poder de corte. Apesar dos métodos de trabalho distintos, verifica-se que os resultados obtidos pelos dois colaboradores são concordantes.

De forma a resumir e simplificar a análise, encontram-se na Tabela 30 os valores mais importantes deste ensaio. Note-se que se entende por **Máximo** e **Mínimo** o valor máximo ou mínimo de pneus inspecionados durante um único afiamento.

Observa-se que as ferramentas que apresentam menor oscilação de resultados são as do aço C45E. Estas são também as que apresentam um valor médio de pneus inspecionados inferior. A ferramenta em “Vanadis 8”, como se referiu, é a ferramenta que permite a inspeção de um maior número de pneus, no entanto, é a que apresenta uma maior oscilação de resultados.

Tabela 30 - Tabela resumo dos testes de materiais.

Colaborador	Ferramenta	Nº médio de pneus	Máximo	Mínimo	Total de pneus	Amostras
Colaborador 1	“Sleipner”	≈106	139	70	1169	11
	“Vanadis 8”	≈215	340	114	2367	11
	C45E	≈70	94	46	767	11
Colaborador 2	“Sleipner”	≈167	216	113	1002	6
	“Vanadis 8”	≈450	721	262	2697	6
	C45E	≈136	178	94	817	6

Sabendo que, em média, um colaborador inspeciona 800 pneus por turno, os valores apresentados na tabela anterior indicam que a implementação de um novo tipo de material permitiria que estes utilizassem/possuíssem menos ferramentas. Os valores médios de ferramentas necessárias por turno estão representados na Tabela 31. Este aspeto diminuiria o tempo necessário despendido por turno no processo de afiamento, bem como o espaço necessário para armazenar o material em causa.

Tabela 31- Número de facas necessárias em média por turno.

	“Sleipner”	“Vanadis 8”	C45E
Colaborador 1	≈8	≈4	≈12
Colaborador 2	≈5	≈2	≈6

Neste teste em ambiente real, o material “Vanadis 8” revelou um melhor comportamento em relação aos demais. Enquanto que a fraca resistência das facas compostas por C45E pode ser explicada pela ausência de carbonetos na sua microestrutura, o mesmo não se pode afirmar quanto às facas compostas pelo material “Sleipner”.

Para além da dureza, observa-se nos materiais “Sleipner” e “Vanadis 8”, uma microestrutura diferente, como mencionado em 4.2. A diferença entre as microestruturas reflete-se sobretudo na morfologia e repartição dos carbonetos na sua matriz. Uma vez que o comportamento das ferramentas durante a operação de corte está relacionado com a qualidade da aresta de corte, era expectável obter-se melhores resultados com o material “Vanadis 8”. Este apresenta maior facilidade de obter uma aresta de corte mais resistente e definida., devido à menor dimensão dos carbonetos.

De referir que o ensaio por esfera rotativa analisado em 4.3 não replica o processo real, uma vez que o desgaste originado pelas partículas abrasivas presentes na borracha é diferente ao provocado pelo contacto metal-metal com partículas abrasivas de SiC.

4.4.2 Estudo da influência do afiamento

Neste subcapítulo, encontram-se os resultados do estudo da influência do afiamento em relação ao desempenho das ferramentas. Este ensaio foi realizado simultaneamente com o apresentado em 4.4.1. Nas figuras representadas abaixo, pode ver-se o número de pneus inspecionados em função do volume desgastado durante o afiamento precedente, para os três tipos de materiais. Os primeiros três (Figura 73, Figura 74 e Figura 75) são referentes ao Colaborador 1, enquanto que os três restantes (Figura 76, Figura 77 e Figura 78) são referentes ao Colaborador 2. Como se pode verificar, devido à fratura de uma ferramenta (referida em 4.4.1), os resultados do Colaborador 2 apresentam menos amostras que o Colaborador 1.

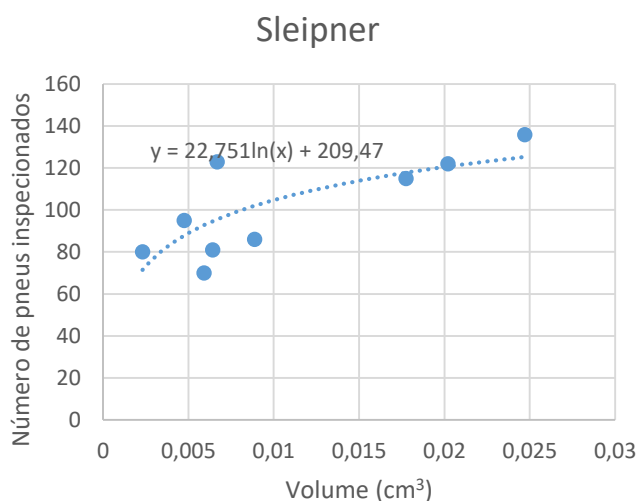


Figura 73 - Número de pneus inspecionados em função do volume desgastado no afiamento. Ferramenta “Sleipner” utilizada pelo colaborador 1.

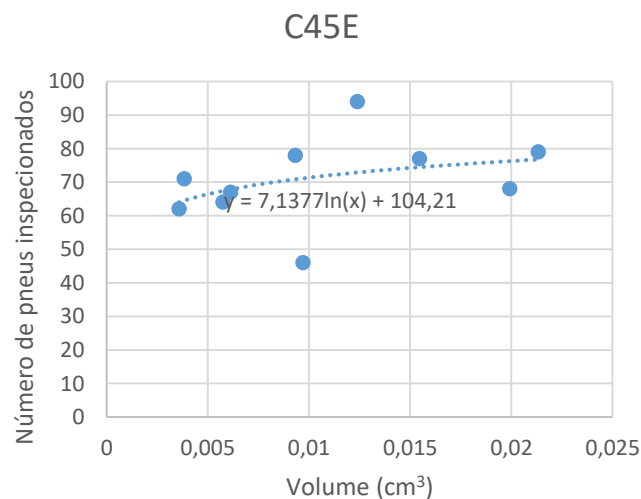


Figura 74 - Número de pneus inspecionados em função do volume desgastado no afiamento. Ferramenta C45E utilizada pelo colaborador 1.

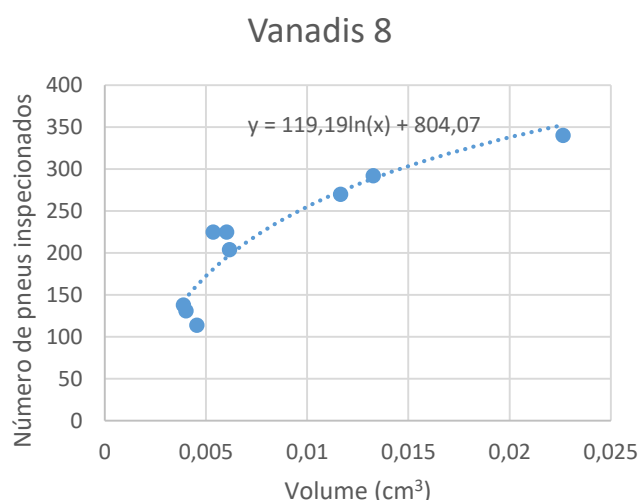


Figura 75 - Número de pneus inspecionados em função do volume desgastado no afiamento. Ferramenta em “Vanadis 8” utilizada pelo colaborador 1.

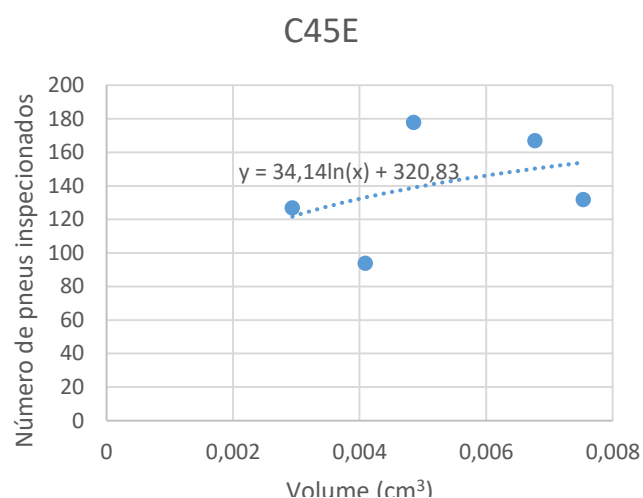


Figura 76 - Número de pneus inspecionados em função do volume desgastado no afiamento. Ferramenta em C45E utilizada pelo colaborador 2.

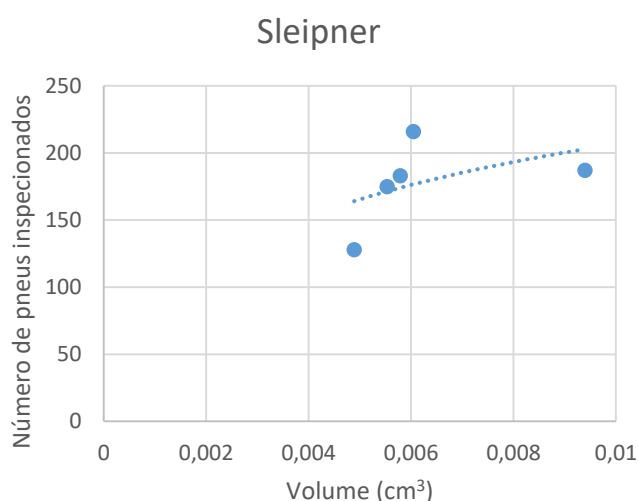


Figura 77 - Número de pneus inspecionados em função do volume desgastado no afiamento. Ferramenta em “Sleipner” utilizada pelo colaborador 2.

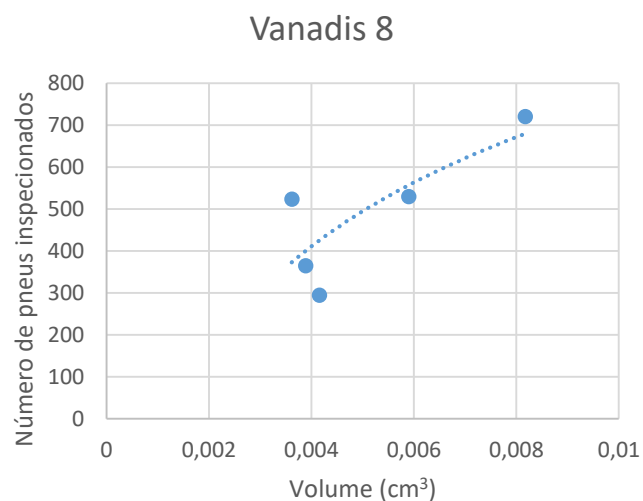


Figura 78 - Número de pneus inspecionados em função do volume desgastado no afiamento. Ferramenta em “Vanadis 8” utilizada pelo colaborador 2.

Observando os gráficos referentes a ambos os colaboradores, verifica-se que existe uma tendência para um melhor desempenho da ferramenta à medida que o volume de material removido no afiamento aumenta. É também notório, principalmente nos resultados referentes ao colaborador 1, que a melhoria da performance das facas tende a estabilizar para grandes volumes removidos. Isto indica que é possível encontrar um intervalo ótimo que permite obter um bom afiamento das ferramentas de corte, possibilitando a maior durabilidade destas, removendo a menor quantidade de material possível.

4.4.3 Estudo da influência da nitruração e revestimentos superficiais

Os resultados do estudo da influência da nitruração e revestimentos superficiais encontram-se representados nas Figura 79 e Figura 80. A primeira expõe os resultados obtidos com o Colaborador 3, e a segunda os resultados obtidos com o Colaborador 4. Nestas figuras observa-se a evolução do número de pneus inspecionados ao longo dos distintos afiamentos realizados.

Os resultados obtidos com o colaborador 3 sugerem que os tratamentos de superfície resultam numa melhoria das ferramentas, sendo o tratamento de nitruração o que apresenta melhores resultados. Com a ferramenta submetida a este tratamento, o colaborador inspecionou em média cerca de 250 pneus. Este valor é aproximadamente 1.67 vezes superior ao obtido com a ferramenta em C45E atualmente utilizada, sem qualquer tipo de tratamento (150 pneus). Quando o colaborador utilizou a ferramenta com revestimento de PTFE, foram inspecionados em média 245 pneus, cerca de 1.63 vezes mais em relação à ferramenta comum, devido ao comportamento anti-aderente da ferramenta.

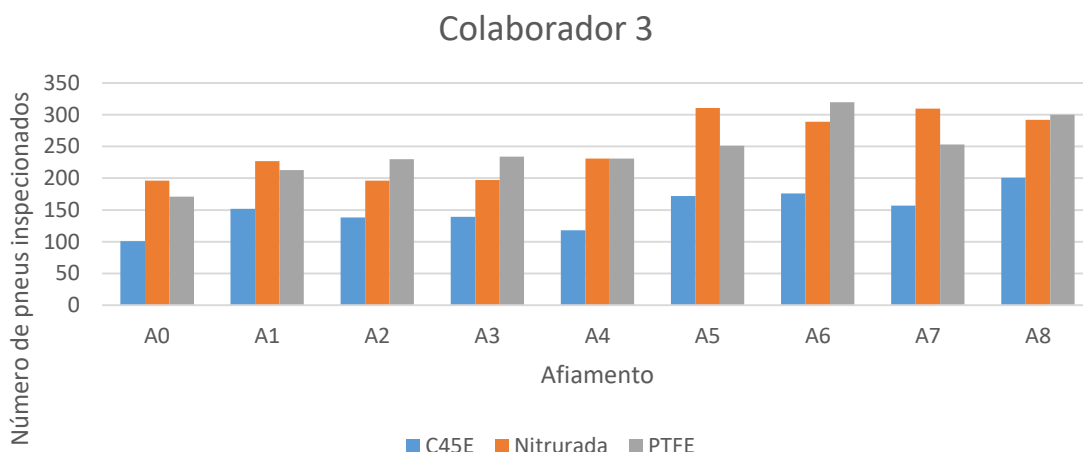


Figura 79 - Resultados obtidos com o colaborador 3 no estudo da influência dos tratamentos superficiais.

Os resultados referentes ao trabalho do colaborador 4 são de interpretação mais difícil, uma vez que se verifica uma grande oscilação nos valores.

A ferramenta com a qual se obteve melhores resultados foi a fabricada em “Vanadis 8” com um revestimento PVD. Com esta foram inspecionados em média 490 pneus, cerca de 4.26 vezes mais em relação à ferramenta em C45E sem qualquer tipo de tratamento superficial. De referir que se obtiveram poucas amostras com esta ferramenta, devido a uma fratura provocada por uma queda da mesma. Apesar de se observar os melhores resultados, entende-se que é de interesse a obtenção de mais amostras.

Das restantes ferramentas, aquela submetida ao tratamento de nitruração foi novamente a que apresentou um melhor desempenho. Com o uso desta, inspecionaram-se em média aproximadamente 1.45 vezes mais pneus em comparação com a ferramenta sem nenhum tipo de revestimento ou tratamento.

Em relação à ferramenta revestida com PTFE, o colaborador 4 inspecionou em média 1.39 vezes mais pneus que a ferramenta comum.

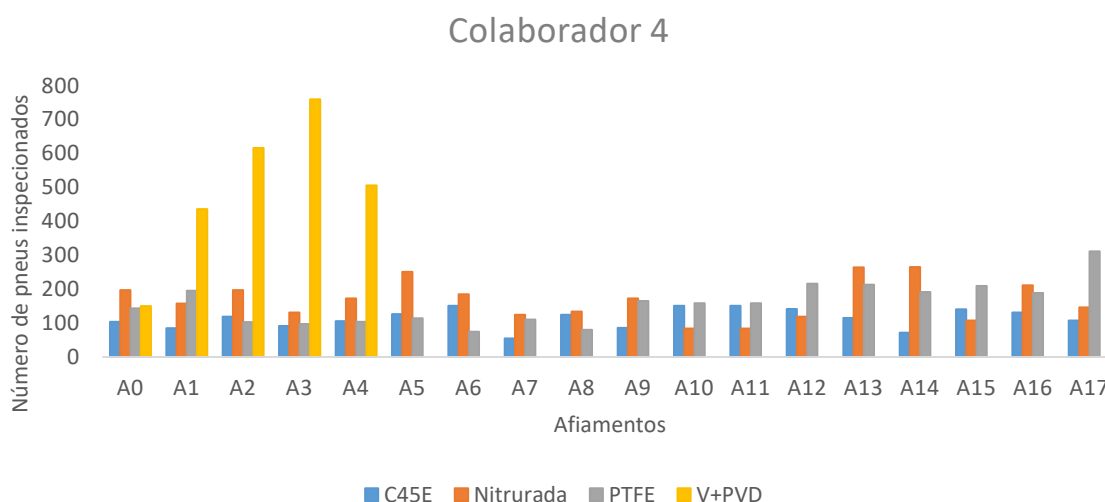


Figura 80 - Resultados obtidos com o colaborador 4 no estudo da influência dos tratamentos superficiais.

Para melhor análise, encontra-se na Tabela 32 um resumo dos resultados deste ensaio. É importante referir que à semelhança da tabela encontrada em 4.4.1, entende-se por **Máximo** e **Mínimo** o valor máximo ou mínimo de pneus inspecionados num único afiamento. Nesta tabela, encontra-se também o valor médio de pneus inspecionado por afiamento, assim como a quantidade de amostras e número total de pneus inspecionados com cada faca.

Verifica-se que, apesar do baixo número de amostras, a ferramenta em “Vanadis 8” com revestimento PVD é a que apresenta um valor médio de pneus inspecionados maior. No entanto, encontra-se nestes resultados uma grande oscilação.

Como se analisou, os vários tratamentos resultam em melhorias do comportamento das ferramentas, no entanto é de interesse realizar uma análise económica para averiguar a viabilidade destes.

Tabela 32 - Resumo dos valores do ensaio dos tratamentos superficiais.

Colaborador	Ferramenta	Nº médio de pneus	Máximo	Mínimo	Total de pneus	Amostras
Colaborador 3	C45E	≈150	201	101	1354	9
	Nitrurada	≈250	311	196	2249	9
	PTFE	≈245	320	171	2203	9
Colaborador 4	C45E	≈115	151	55	2061	18
	Nitrurada	≈167	265	84	3006	18
	PTFE	≈158	312	75	2839	18
	V+PVD	≈494	760	150	2468	5

5 Análise da viabilidade económica da alteração do material

Neste capítulo, encontra-se o estudo de viabilidade económica. Este tem como objetivo verificar se a alteração do material das facas se reflete numa redução dos custos associados à etapa de inspeção visual final, no processo de produção de um pneu. Para isso, usaram-se:

- Dados de produção fornecidos pela empresa que produz as ferramentas;
- Dados obtidos nos testes em ambiente real;
- Pedidos de cotação dos materiais;

Considerou-se também como modelo, o da faca original, efetuando-se os cálculos tendo em conta as dimensões dessa faca (exceto a espessura), uma vez que neste capítulo apenas se pretende estudar a viabilidade económica da alteração do material.

Como ponto de partida, utilizaram-se os dados de produção fornecidos pela empresa que produz as ferramentas de corte. Estes afirmam que, a partir de uma chapa de aço com as dimensões indicadas na Tabela 33, produzem-se 41 ferramentas.

Tabela 33 - Dimensões de uma chapa para produção de ferramentas de corte.

Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Largura(mm)
3	1020	181.5

Uma vez que foi referido que o material é retirado ao longo do comprimento da chapa, sabe-se a quantidade de material utilizado para cada ferramenta, realizando o seguinte cálculo:

$$\frac{1020}{41} \approx 24.88 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Deste modo, sabe-se que na produção de cada ferramenta são utilizadas frações de chapa de aço com as dimensões presentes na Tabela 34.

Tabela 34 - Dimensões da fração de chapa necessária para produzir uma ferramenta.

Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Largura(mm)
3	181.5	24.88

Pode-se verificar que estas medidas são superiores às presentes no desenho técnico da ferramenta de corte presente no anexo C. Esta diferença deve-se ao material necessário para as operações de produção da ferramenta, explicadas em 3.1.

Na Tabela 35 estão representados os valores do pedido de cotação dos aços, assim como a sua massa volúmica.

Tabela 35 - Pedido de cotação e massa volúmica dos aços.

Aço	Preço (€/kg)	Massa volúmica (g/cm³)
C45E	1.16	7.83
“Vanadis 8”	36	7.46
“Sleipner”	12.5	7.77

Sabendo o preço, massa volúmica, dimensões necessárias para se produzir uma ferramenta e espessura em que as chapas estão disponíveis, pode-se estimar o custo que se teria com o material para os diferentes tipos de aço.

Assumindo o custo da faca atual (5€), estima-se que o custo de mão-de-obra seja de aproximadamente 4.88€ uma vez que o custo do aço é cerca de 0.12€. Dado que o processo de fabrico é o mesmo para todos os materiais, assumiu-se um valor de 5€ como valor de mão-de-obra para fins de cálculo. Com a majoração do valor de mão-de-obra e do preço final da ferramenta, pretende-se cobrir o desgaste adicional das ferramentas utilizadas para o fabrico das facas, motivado pela maior resistência destes materiais. Estas encontram-se na Tabela 36, a estimativa de custo das ferramentas utilizando espessuras de 4.2 mm e 4.56 mm para os aços “Sleipner” e “Vanadis 8”, respetivamente. Estas espessuras foram indicadas pelo fornecedor aquando do pedido de cotação.

Tabela 36 - Estimativa de custo de ferramenta para cada tipo de material.

	C45E	“Vanadis 8”	“Sleipner”
Massa (kg)	0.106	0.154	0.160
Custo do aço/ferramenta (€)	0.12	5.53	2
Preço da ferramenta (€)	≈5	≈11	≈7
Percentagem do custo do aço no custo da ferramenta (%)	2.5	50.3	28.6

Utilizando os dados obtidos no teste real (capítulo 4.4.1), pode-se estimar o custo que cada faca tem por cada pneu inspecionado. Esses valores, assim como as perspetivas de poupança anual, encontram-se na Tabela 37.

Tabela 37 - Relações entre custo da ferramenta e do número de pneus inspecionados.

	Colaborador 1			Colaborador 2		
	<u>C45E</u>	<u>“Vanadis 8”</u>	<u>“Sleipner”</u>	<u>C45E</u>	<u>“Vanadis 8”</u>	<u>“Sleipner”</u>
Pneus/ferramenta	767	2367	1169	817	2697	1002
Custo da faca (€)	5	11	7	5	11	7
Custo da faca/pneu (€)	0.00652	0.00465	0.00599	0.00612	0.00408	0.00699
Montante gasto em facas por ano (€)	130443.29	92991.11	119820.36	122460.22	81612.89	139790.44
Poupança anual (%)		28.7	8.1		33.4	-14.2

Uma vez que se produzem em média 58000 pneus por dia, e que a fábrica trabalha 345 dias por ano, sabe-se que são produzidos anualmente cerca de 20 010 000 pneus.

Após estes cálculos, verifica-se que apesar da ferramenta em “Vanadis 8” apresentar um custo 2.2 vezes superior, esta permite uma poupança de 28.7 e 33.4 %, de acordo com os resultados obtidos com o colaborador 1 e 2, respetivamente.

Por outro lado, a ferramenta em “Sleipner”, apesar de ter um custo apenas 1.4 vezes superior à atual, não apresenta resultados tão satisfatórios como a constituída por “Vanadis 8”. Com os resultados obtidos pelo colaborador 1, apenas se conseguiria poupar 8.1%. Em relação aos resultados obtidos com o colaborador 2, a implementação desta ferramenta resultaria num prejuízo de cerca de 14.2%.

Para que esta análise fosse mais precisa, seria necessária uma amostra estatística maior, além de um pedido de cotação mais preciso do valor de mão-de-obra. No entanto, com os valores obtidos ao longo deste trabalho, verifica-se que o material “Vanadis 8” é aquele com que se poderá obter melhores resultados.

6 Desenvolvimento/Otimização da ferramenta de corte

O objetivo desta dissertação é a otimização da ferramenta de corte atualmente utilizada no corte da rebarba de borracha. Desse modo, e uma vez que no capítulo 3 foi efetuada uma análise de possíveis materiais e tratamentos térmicos e superficiais que permitissem melhorias no comportamento da ferramenta, este capítulo apresenta a evolução da solução construtiva proposta, que visa também a otimização da ferramenta.

A primeira melhoria apontada (punho ergonómico), apresenta um grau de dificuldade alto. Não sendo este um problema recente, foram já testados diversos tipos de punho realizados pela empresa, sendo estes sucessivamente rejeitados pelos operadores. Analisando esses protótipos, e considerando os mesmos como o caminho a não seguir, tem-se que este punho necessita de ser:

- **Pouco volumoso**, uma vez que os operadores já se encontram com técnicas de trabalho bem definidas e interiorizadas, uma mudança muito drástica neste ponto pode levar a uma rejeição da ferramenta;
- **Leve**, uma vez que é um instrumento que é manuseado durante todo o horário de trabalho, quanto mais leve for, mais confortável será para o seu utilizador;
- **Resistente**, pois este necessita de apresentar uma resistência capaz de suportar os esforços provocados quando está a ser utilizada;
- **Ergonómico**, de forma a diminuir a força necessária para desempenhar a operação, diminuindo também a pressão a que as zonas de contacto na mão estão sujeitas.

Para o desenvolvimento deste punho, contou-se com uma equipa de quatro estudantes do Mestrado de Design Industrial e de Produto da UP.

A conceção deste produto, assim como o de qualquer outro, baseou-se num processo iterativo, no qual se apresentam distintas soluções, estando estas sujeitas a uma avaliação dos respetivos prós e contras, de maneira a que se torne mais fácil a progressão e aceitação.

Visto que um dos objetivos do projeto é a redução das despesas associadas a esta etapa do processo de produção de um pneu, a nova ferramenta deve ter um custo ajustado ao seu desempenho, de modo que esse objetivo seja concretizado. Além disso, a crescente preocupação a nível ambiental por parte da empresa, é algo que também se deve ter em conta. Por esses motivos, assumiu-se que o novo conceito da ferramenta deveria reduzir ao máximo o material desperdiçado, uma vez que se encontravam a ser testados materiais com um custo superior ao atualmente implementado.

Solução 1

De acordo com o que se referiu anteriormente, foi elaborado um primeiro protótipo, que serviu de base para as alterações subsequentes. Neste, utiliza-se um cabo reutilizável, onde se insere uma parte amovível semelhante a uma faca com um cabo mais curto. A união entre as duas partes seria feita através de uma ligação aparafusada, como se pode ver na Figura 81.

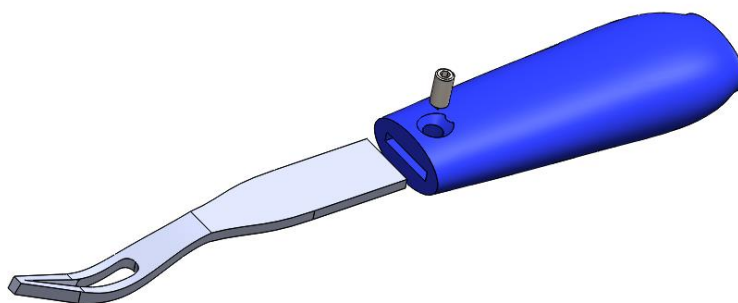


Figura 81 - Imagem representativa da solução 1.

Esta solução, além de possuir um cabo ergonómico, permite a redução do material utilizado na faca, uma vez que este não é necessário para criar um cabo completo. A redução de material utilizado é um ponto favorável, uma vez que grande parte do material utilizado na faca apenas desempenhava a função de cabo da ferramenta, sendo desperdiçada uma grande quantidade de material no final da vida útil da mesma.

Em contrapartida, a ligação aparafusada poderia causar desconforto ao utilizador, uma vez que esta se encontra numa zona de manuseamento. Além disso, apesar da redução, esta solução utiliza uma grande quantidade de material que pode ser considerada “não útil”. Assim, não sendo esta solução satisfatória, procurou-se desenvolver novas abordagens.

Solução 2

Pretendendo-se um método alternativo à ligação aparafusada e que permitisse reduzir a quantidade de material desperdiçado, foram idealizadas algumas alternativas, sendo consideradas insatisfatórias, como por exemplo um sistema de encaixe como o representado na Figura 82.

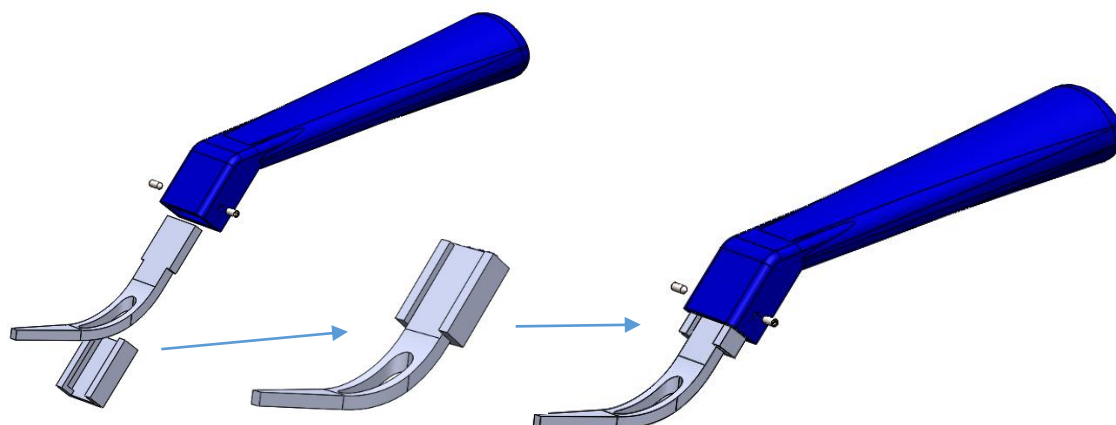


Figura 82 - Imagem representativa de uma das soluções idealizadas.

Esta alternativa, apesar de reduzir a quantidade de material desperdiçada, apresenta mais do que uma parte amovível, o que é um aspecto desfavorável.

Porém, através deste processo iterativo, chegou-se à solução representada na Figura 83, que não apresenta ligações aparafusadas na zona do cabo e reduz drasticamente o tamanho da lâmina, sendo apenas essa parte a ser substituída no final da sua vida útil. O cabo da ferramenta teria a função de porta-lâminas, sendo estas fixadas através de um guiamento e um parafuso/batente. Este conceito permite uma grande redução do material desperdiçado. Apesar do conceito da ferramenta ser satisfatório, apresenta um aspecto limitador importante: uma vez que se trata de lâminas com tamanhos reduzidos e que requerem precisão na construção, a sua produção em massa através de processos de maquinagem torna-se extremamente difícil, o que se traduz num custo acrescido no preço da lâmina.

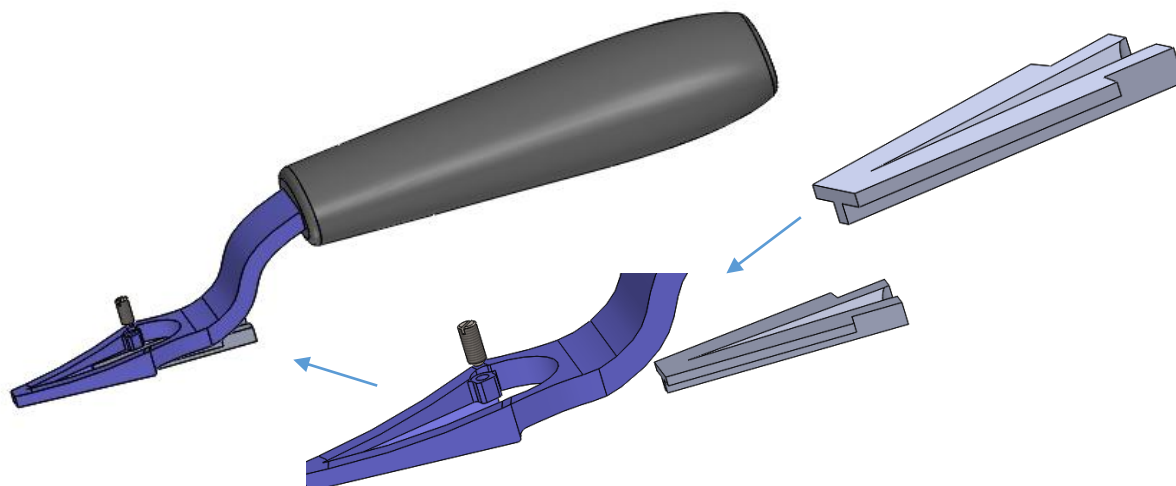


Figura 83 - Imagem representativa da solução 2.

Solução 3

Esta solução surge de forma a contornar o aspeto desfavorável mencionado anteriormente. Partindo-se da solução anterior, e alterando a geometria da ferramenta, sendo o guiamento feito pelo ângulo exterior da lâmina. Com a colaboração do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), foram feitos testes com três ângulos distintos, para definir o melhor ângulo para realizar a fixação da lâmina no cabo. Estes testes consistiram em maquinar três facas com esses ângulos, e testar o acoplamento em suportes poliméricos impressos por fabrico aditivo, de acordo com os respetivos ângulos. Os ângulos testados foram de 15°, 30° e 45° como se pode observar na Figura 84, o que permitiu chegar às seguintes conclusões:

- O ângulo de 15° é demasiado baixo, para garantir um bom guiamento da lâmina no suporte;
- O ângulo de 30° permite um bom acoplamento;
- O ângulo de 45° permite um bom acoplamento, mas torna a geometria da lâmina muito pronunciada.

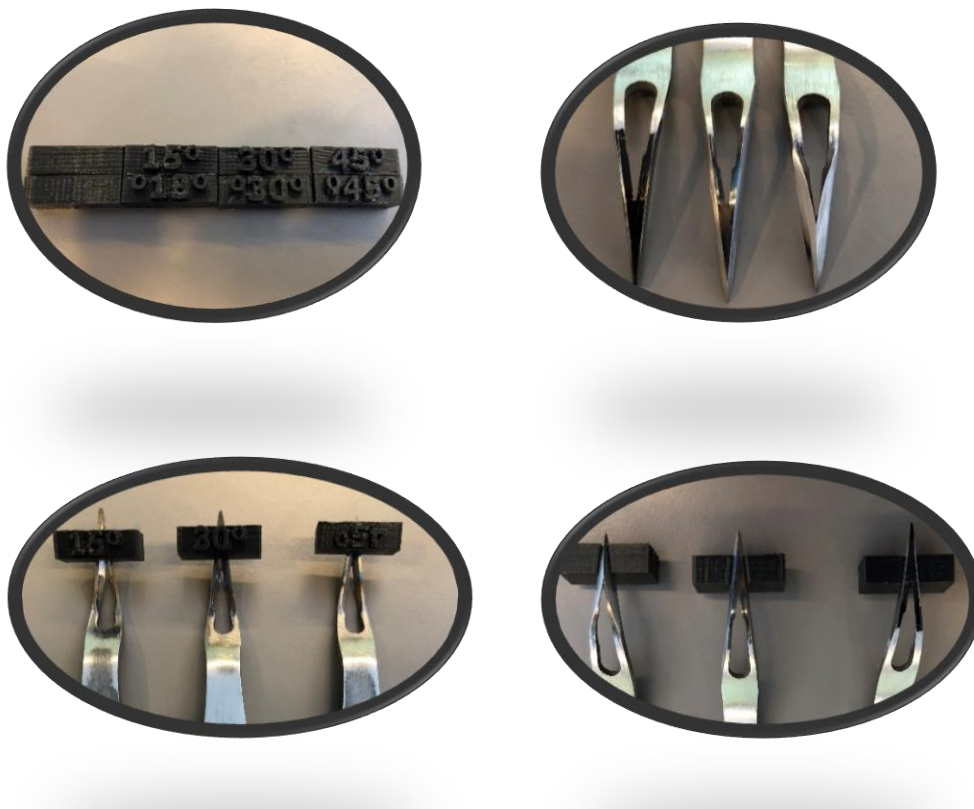


Figura 84 - Detalhes do ensaio de ângulos para encaixe.

O ângulo escolhido, e que permite um melhor compromisso entre a geometria da lâmina e o acoplamento, é o de 30°.

Devido à maior simplicidade da nova geometria da lâmina (Figura 85), é possível a sua produção pelos processos de corte laser ou por eletroerosão por fio, embora sejam necessárias máquinas mais sofisticadas com quatro graus de liberdade. Isto permite um grande aproveitamento da matéria-prima, através da disposição de sucessivas lâminas acopladas, tal como se pode observar na Figura 86.

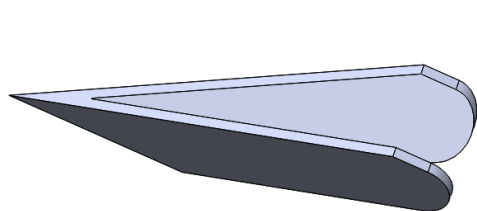


Figura 85 - Imagem representativa da lâmina.

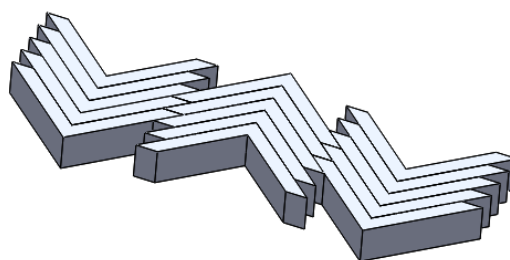


Figura 86 - Disposição otimizada das lâminas para corte.

Deve-se também referir que este novo conceito permite o teste de novos materiais com maior facilidade, como por exemplo lâminas de carboneto de tungstênio. Esta solução encontra-se representada na Figura 87.

No anexo D e E encontram-se os desenhos técnicos do protótipo desta solução.

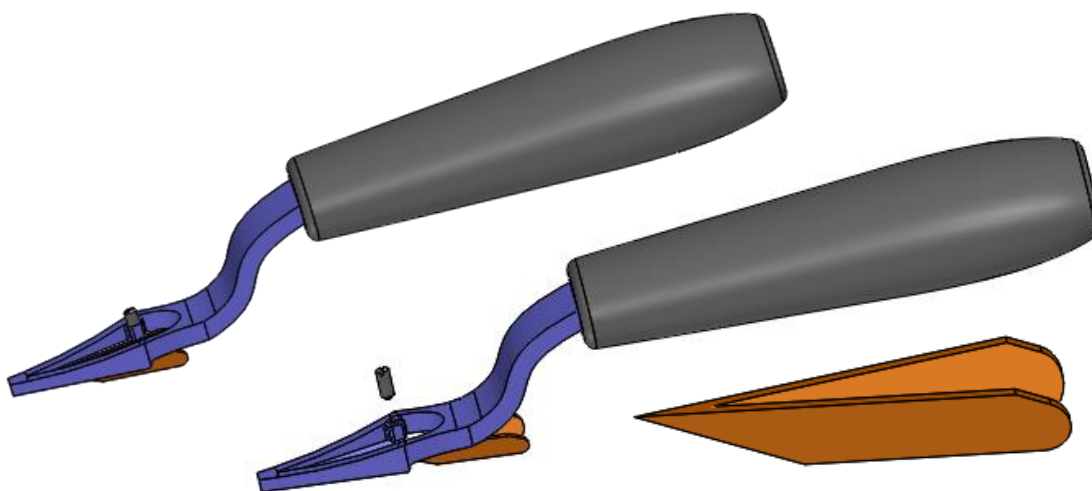


Figura 87 - Imagem representativa da solução 3.

7 Conclusões e propostas de trabalho futuro.

7.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo a otimização da ferramenta de corte de rebarba na indústria de pneus. Como etapas principais, foram realizadas a seleção do material para a zona de corte da ferramenta e o desenvolvimento de uma solução construtiva que permitisse um maior conforto para os operadores, e que também reduzisse os custos associados à operação de corte de rebarba.

Os resultados obtidos no teste de desgaste de micro-abrasão por esfera rotativa e nos ensaios em ambiente real, evidenciam que a presença de carbonetos na matriz martensítica influencia de forma positiva a resistência ao desgaste, uma vez que se obteve com todas as amostras melhores resultados, em comparação com o aço AISI 1045 (aço de construção que não apresenta carbonetos).

A morfologia dos carbonetos mostrou-se influente, tendo em conta o tipo de aplicação. No ensaio de desgaste de micro-abrasão por esfera rotativa, as amostras (AISI D2 e “Sleipner”) com carbonetos mais grosseiros tiveram um melhor comportamento, enquanto para os ensaios em teste real a amostra (“Vanadis 8”) que apresenta carbonetos finos e bem distribuídos apresentou os melhores resultados.

A seleção do melhor material teve em conta, não só o comportamento deste nos ensaios em ambiente real, mas também uma análise económica, baseada nos resultados obtidos e informações recolhidas junto de várias empresas. Apesar de apresentar um custo superior, o aço “Vanadis 8” revela-se a melhor opção, resultando numa redução dos custos associados ao processo de corte de rebarba dos pneus em cerca de 30%.

O processo de afiamento revelou-se uma tarefa difícil, sendo passível à implementação de melhorias, de forma a otimizar todo o processo envolvente.

A nova solução construtiva da ferramenta foi idealizada de modo a que:

- Possua um cabo ergonómico, para que seja mais confortável para o operador;
- Reduza drasticamente a quantidade de material desperdiçado.

Esta solução, além dos aspetos referidos, permite, devido à simplicidade geométrica da lâmina, testar de forma mais fácil distintos materiais, nomeadamente lâminas em carbonetos de tungsténio.

7.2 Trabalhos futuros

De forma a dar seguimento ao trabalho realizado nesta dissertação, e com o intuito de continuar a melhorar o desempenho da ferramenta, assim como todo o processo envolvente, são feitas algumas propostas de trabalhos futuros.

Deve ser feito um novo estudo recorrendo a um maior número de amostras, de modo a aumentar a fiabilidade dos resultados.

Recomenda-se também, avaliar a viabilidade económica da implementação dos distintos revestimentos e da nitruração.

É fundamental testar a nova solução construtiva em ambiente real, e ser feito novamente um estudo económico baseado nas suas características e resultados.

Propõe-se o teste de diferentes materiais na constituição da lâmina de corte, sobretudo o uso de pastilhas de carbonetos cementados que, na ausência do novo conceito da ferramenta aqui desenvolvido, se mostraram impossíveis de testar.

Entende-se que é pertinente uma análise ao material “Vanadis 8”, de forma a entender as causas das fraturas ocorridas durante os ensaios em ambiente real.

Estudar a hipótese de reutilizar borracha proveniente de outras etapas do processo de produção de um pneu para produzir pegas para a ferramenta, de modo a reduzir o desperdício deste material.

Tal como referido no decorrer da presente dissertação, o processo de afiamento pode ter um impacto direto na redução de custos do processo de corte de rebarba, e revelou-se suscetível a melhorias. Recomenda-se o uso de diferentes esmeris no processo de afiamento, de forma a estudar a influência do tamanho das partículas na qualidade do afiamento. Ainda sobre este processo, propõe-se também um estudo mais aprofundado, de modo a compreender melhor as forças envolvidas e as quantidades de material removido em função do tempo.

Por fim, de forma a relacionar as últimas sugestões, propõe-se a automatização do processo de afiamento, para que este seja feito de forma mais regular e de modo a garantir uma melhor aresta de corte, removendo a menor quantidade possível de material.

8 Referências

- [1] Continental, “Tyre Basics: Passenger Car Tyres,” 2013. [Online]. Available: <https://www.continental-tires.com>. [Accessed: 21-Apr-2018].
- [2] Mesnac, [Online]. Available: www.mesnac.com. [Accessed: 09-Feb-2018].
- [3] S. Nappi, N. D’Uva, S. Amendola, C. Occhiuzzi, and G. Marrocco, “A near-field RFID sensor network for the realtime monitoring of tire vulcanization,” *2017 IEEE Int. Conf. RFID Technol. Appl.*, pp. 69–73, 2017.
- [4] J. E. Mark, B. Erman, C. M. Roland, and A. Y. Coran, “Chapter 7 – Vulcanization,” in *The Science and Technology of Rubber*, 2013, pp. 337–381.
- [5] Continental, [Online]. Available: www.continental-pneus.pt. [Accessed: 12-Feb-2018].
- [6] D. Marchadier, T. Petrina, D. Stringer, and M. Owen, “Mold and method for vulcanizing tires,” U S2016/0167326 A1, 2016.
- [7] D. M. Reep, E. S. Seroka, M. J. Clark, and D. L. Spencer, “Segmented tire mold to reduce flash,” US 2004/0018262 A1, 2004.
- [8] Continental, “Flash examples,” 2017. [Online]. Available: Intranet.
- [9] AtacadaoPneus, [Online]. Available: <https://www.atacadaopneus.com.br/pneu-145-80-r13-75t-amazer-3g-apollo-p983>. [Accessed: 07-May-2018].
- [10] L. Mattos, M. Rodrigues, M. Francisco, and M. Dias, “Relatório: Visita Fábrica Continental,” Porto, 2018.
- [11] R. C. Popescu, D. Popescu, and A. M. Grumezescu, “Applications of rubber-based blends,” in *Recent Developments in Polymer Macro, Micro and Nano Blends*, Elsevier, 2017, pp. 75–109.
- [12] J. E. Mark, B. Erman, C. M. Roland, B. Rodgers, and W. Waddell, “Chapter 9 – The Science of Rubber Compounding,” in *The Science and Technology of Rubber*, 2013, pp. 417–471.
- [13] H. Heisler and H. Heisler, “Tyres,” in *Advanced Vehicle Technology*, Elsevier, 2002, pp. 270–310.
- [14] G. R. Hamed, “Materials and Compounds,” in *Engineering with Rubber*, 2012, pp. 11–36.
- [15] J. E. Mark, B. Erman, C. M. Roland, B. Rodgers, and W. Waddell, “Chapter 14 – Tire Engineering,” in *The Science and Technology of Rubber*, 2013, pp. 653–695.
- [16] Matador Rubber s.r.o, “Rubber Chemistry,” *Virtual Educ. Rubber Technol.*, p. 94, 2007.
- [17] Arvind Mafatlal Groups and Nocil Limited, “Vulcanization & Accelerators.” [Online]. Available: <http://www.nocil.com/Downloadfile/DTechnicalNote-Vulcanization-Dec10.pdf>. [Accessed: 19-Feb-2018].
- [18] V. R. and P. Products, “RMA Handbook,” *Molded Rubber Products*, 2005. [Online]. Available: <http://www.viprubber.com/downloads/RMA-Handbook.pdf>. [Accessed: 01-Mar-2018].
- [19] AGA and The Linde Group, [Online]. Available: http://www.aga.is/en/processes_ren/freezing_cooling/cryogenic_deflashing/index.html.
- [20] Continental, “Flash Removal/Automatic Trimming,” 2017. [Online]. Available: Intranet. [Accessed: 22-Apr-2018].

- [21] Continental, “Trim Tools,” 2017. [Online]. Available: Intranet. [Accessed: 18-Mar-2018].
- [22] B. Bhushan, *Introduction to tribology*, 2 nd. John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [23] J. A. Williams, “Wear and wear particles - Some fundamentals,” *Tribol. Int.*, vol. 38, no. 10, pp. 863–870, 2005.
- [24] I. K. Ř. Íková, B. Szewczykova, P. Blaškovitš, E. Hodulová, and E. L. Č, “Study and Characteristic of Abrasive Wear Mechanisms,” pp. 1–9, 2012.
- [25] Ramesh Singh, “Classification of Steels,” *Appl. Weld. Eng.*, pp. 51–56, 2012.
- [26] G. Roberts, G. Krauss, and R. Kennedy, “Tool Steels,” *ASM Int.*, p. 121, 1998.
- [27] B. L. Bramfitt, “Carbon and Alloy Steels,” in *Mechanical Engineers’ Handbook*, vol. 1, M. Kutz, Ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006, pp. 1–38.
- [28] D. Gandy, *Carbon Steel Handbook*. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2007.
- [29] M. A. H. Howes and G. E. Totten, *Steel heat treatment handbook*. Marcel Dekker, Inc., 1997.
- [30] J. P. Soares, *Aços: características, tratamentos.*, 5^a ed. Porto: Livraria Livroluz, 1992.
- [31] G. E. Totten, *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. Boca Raton, FL, 2007.
- [32] E. P. DeGarmo, J. T. Black, and R. a. Kohser, *DeGarmo’s Materials and Processes in Manufacturing*, 11th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [33] M. Orečný, M. Buršák, M. Šebek, and L. Falat, “Influence of Hardness, Matrix and Carbides in Combination with Nitridation on Abrasive Wear Resistance of X210Cr12 Tool Steel,” *Metals (Basel)*, vol. 6, no. 10, p. 236, 2016.
- [34] A. Kešner, R. Chotěborský, and M. Linda, “The effect of microstructure on abrasive wear of steel,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 237, no. 1, 2017.
- [35] A. Bhattacharya, A. Bagdi, and D. Das, “Influence of microstructure on high-stress abrasive wear behaviour of a microalloyed steel,” *Perspect. Sci.*, vol. 8, pp. 614–617, 2016.
- [36] K. Singh, R. K. Khatirkar, and S. G. Sapate, “Microstructure evolution and abrasive wear behavior of D2 steel,” *Wear*, vol. 328–329, pp. 206–216, Apr. 2015.
- [37] M. Orečný, M. Buršák, and J. Viňáš, “The influence of heat treatment on the abrasive wear resistance of a construction and a tool steel,” *Metallurgija*, vol. 54, no. 1, pp. 191–193, 2015.
- [38] Y. P. Ji, S. J. Wu, L. J. Xu, Y. Li, and S. Z. Wei, “Effect of carbon contents on dry sliding wear behavior of high vanadium high speed steel,” *Wear*, vol. 294–295, pp. 239–245, 2012.
- [39] Azo Materials, 2018. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6719>. [Accessed: 06-May-2018].
- [40] R. Hock, *The Perfect Edge: The Ultimate Guide to Sharpening for Woodworkers*. Popular Woodworking Books, 2010.
- [41] T. Balance, “The Modern Steel Manufacturing Process,” 2017. [Online]. Available: <https://www.thebalance.com/steel-production-2340173>. [Accessed: 28-Apr-2018].
- [42] Z. Y. Liu, N. H. Loh, K. A. Khor, and S. B. Tor, “Microstructure evolution during sintering of injection molded M2 high -speed steel,” vol. 293, no. August, pp. 46–55,

- 2000.
- [43] S. V. Furnace, 2017. [Online]. Available: www.vacfurnace.com. [Accessed: 27-Apr-2018].
- [44] B. Zieger, “Vacuum-Heat-Treatment of hot-work steel.” [Online]. Available: www.isoflama.com.br/assets/pdf/literaturas/1484072140.pdf. [Accessed: 15-Apr-2018].
- [45] Uddeholm, “Heat Treatment of Tool Steel,” *Uddeholm Tool Steel Die Cast.*, vol. 8, pp. 1–20, 2012.
- [46] SECO/Warwick, *Heat Treating Data Book*, 10th ed. Meadville, 2011.
- [47] L. Han, J. T. Dai, X. R. Huang, and C. Zhao, “Study on the fast nitriding process of active screen plasma nitriding,” *Phys. Procedia*, vol. 50, no. October 2012, pp. 94–102, 2013.
- [48] D. Pye, *Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing*. ASM International, 2003.
- [49] D. Gorscak, T. Filetin, and D. Cackovic, “Selection of Steels and Coatings for Cold-Work Tools,” pp. 828–831, 2009.
- [50] PTFE Coatings, 2016. [Online]. Available: <http://www.ptfecoenings.com/ptfe-coatings/wear-resistant.php>. [Accessed: 18-May-2018].
- [51] A. Fluorotec, 2018. [Online]. Available: <https://www.fluoroteccoatings.com/materials/ptfe-coatings/the-ptfe-coating-process/>. [Accessed: 18-May-2018].
- [52] M. Shi, F. Miyazawa, S. Tobe, and T. A. Stolarski, “The Friction and Wear Properties of PTFE Composite-Thermal Spray Metallic Binary Coatings,” *Mater. Trans.*, vol. 46, no. 1, pp. 84–87, 2005.
- [53] S. Paskvale, “Properties of PVD hard coatings,” *Univ. Ljubljana, Faculty Math. Phys.*, pp. 1–18, 2007.
- [54] D. M. Mattox, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. Elsevier Inc., 2010.
- [55] M. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*, 4th editio. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [56] V. P. Astakhov and J. P. Davim, “Tools (geometry and material) and tool wear,” *Mach. Fundam. Recent Adv.*, pp. 29–57, 2008.
- [57] R. Komanduri, “Encyclopedia of Materials: Science and Technology,” *Encycl. Mater. Sci. Technol.*, no. Komanduri, pp. 1–13, 2001.
- [58] C. EduPack, Granta Design Limited, 2017.
- [59] Z. Z. Fang, M. C. Koopman, M. Engineering, and S. L. City, “Cemented Tungsten Carbide Hardmetal - An Introduction,” *Compr. Hard Mater.*, vol. 1, pp. 123–137, 2014.
- [60] J. M. G. de C. Ferreira, *Tecnologia da Pulverometalurgia*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- [61] Ramada, 2018. [Online]. Available: <http://www.ramada.pt/pt/>. [Accessed: 17-Mar-2018].
- [62] ZKnives, [Online]. Available: <http://www.zknives.com>. [Accessed: 21-Mar-2018].
- [63] M G Gee, “Procedure for ball cratering test.” National Physics Laboratory, 1997.
- [64] L. Technologies, [Online]. Available: <https://lmi3d.com/>. [Accessed: 18-May-2018].
- [65] AceroMittal, 2017. [Online]. Available: <http://industeel.arcelormittal.com/wp->

- content/uploads/2017/12/DS-TOOL-D2.pdf. [Accessed: 23-May-2018].
- [66] S. Group, 2016. [Online]. Available: <https://steelselector.sij.si/data/pdf/PK348.pdf>. [Accessed: 25-May-2018].

ANEXO A: Curvas TRC e de Revenido dos materiais utilizados.

“Sleipner”

CCT-GRAPH

Temperatura de austenitização: 1030 °C. Tempo de estágio: 30 min

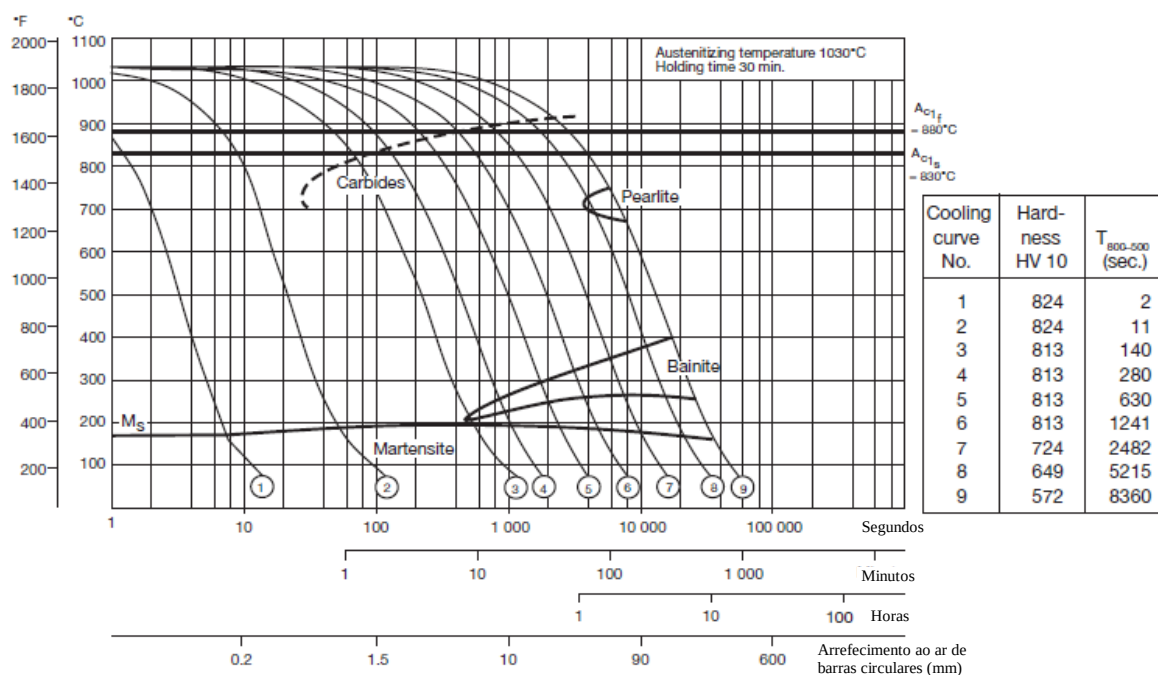


Figura 88 - Curva CTT para o aço “Sleipner” (adaptado de [61]).

[61]

Dureza, HRC

Austenite residual %

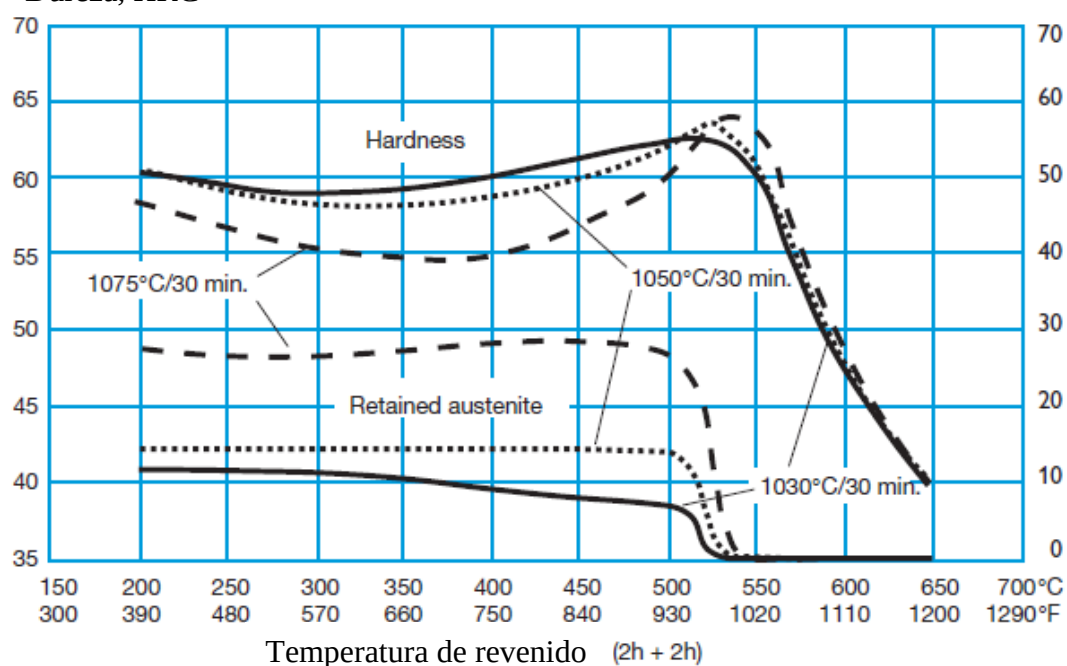


Figura 89 - Curva de revenido para o aço “Sleipner” (adaptado de [61]).

“Vanadis 8”

CCT-GRAPH

Temperatura de austenitização: 1020 °C. Tempo de estágio: 30 min

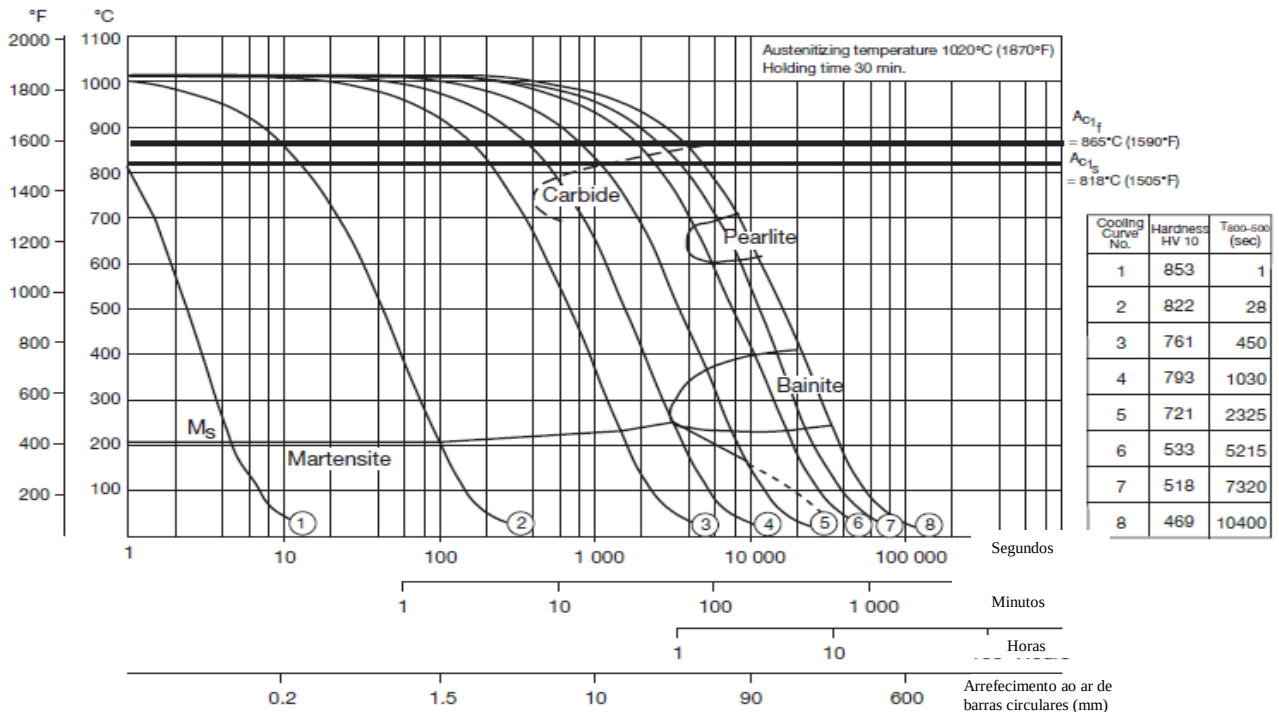


Figura 90 - Curva CTT para o aço “Vanadis 8” (adaptado de [61]).

Dureza, HRC

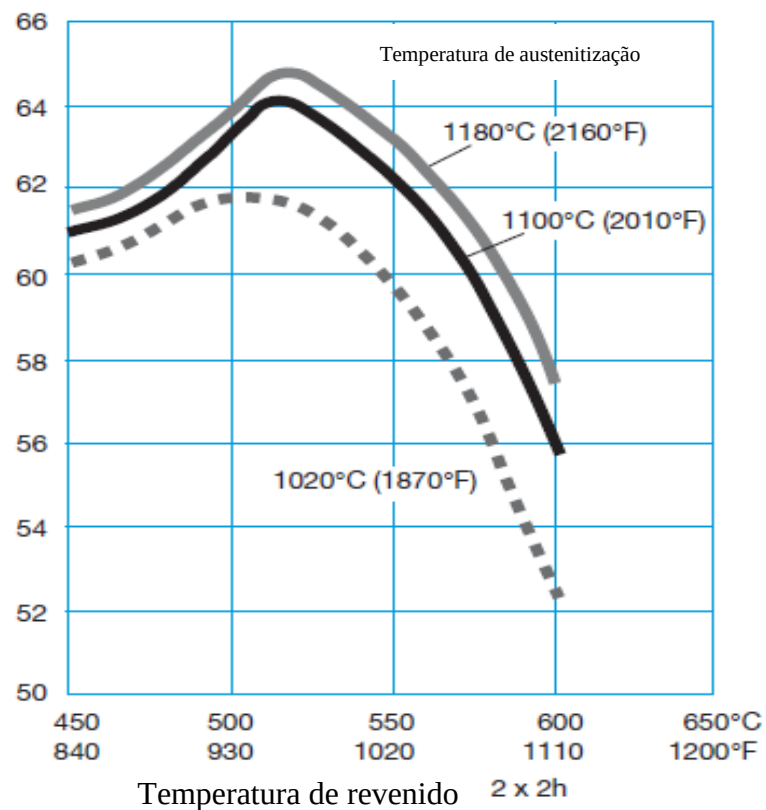


Figura 91 - Curva de revenido para o aço “Vanadis 8” (adaptado de [61]).

AISI D2

Temperatura de austenitização: 1030 °C

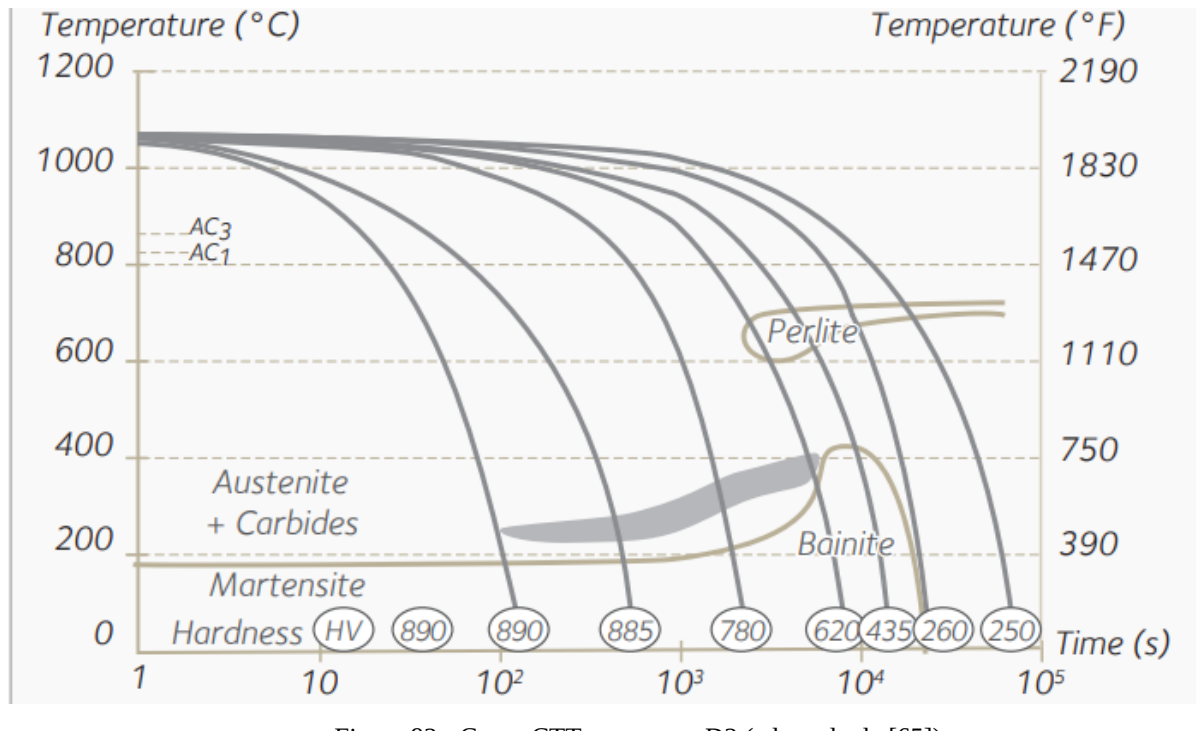


Figura 92 - Curva CTT para o aço D2 (adaptado de [65]).

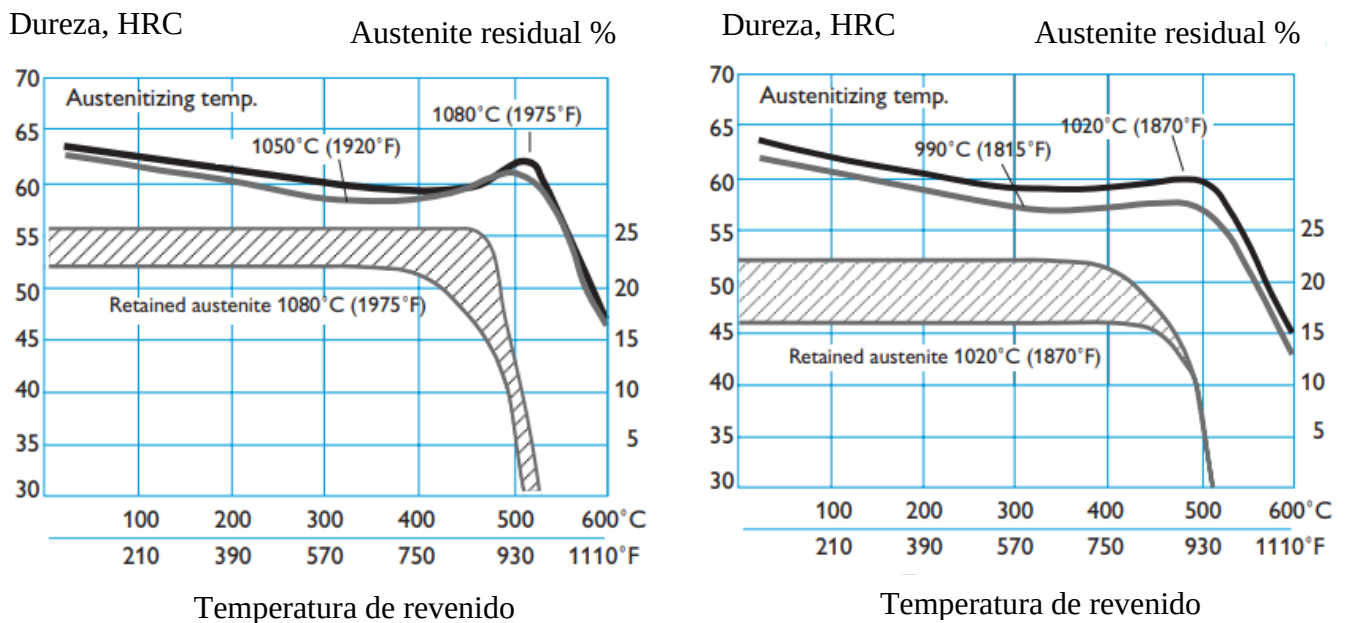


Figura 93 - Curva de revenido para o aço D2 para várias temperaturas (adaptado de [61]).

AISI 440C

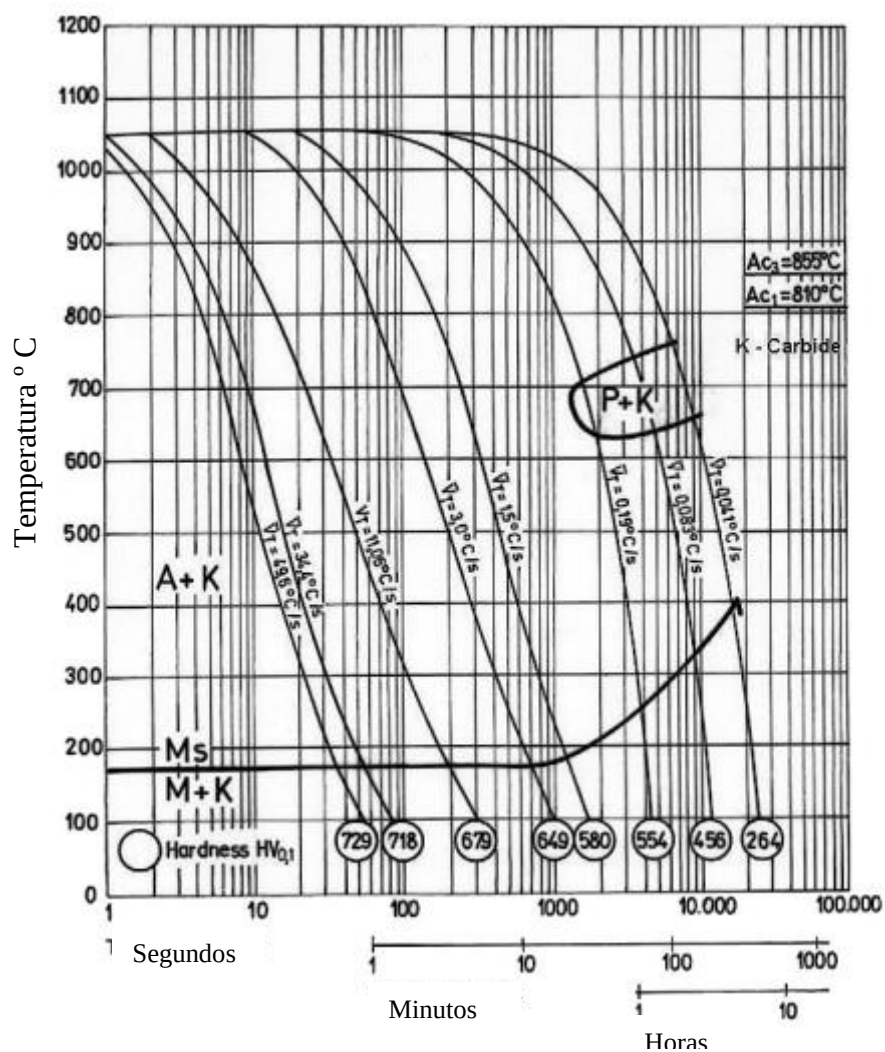


Figura 94 - Curva CTT para o aço 440 C (adaptado de [66]).

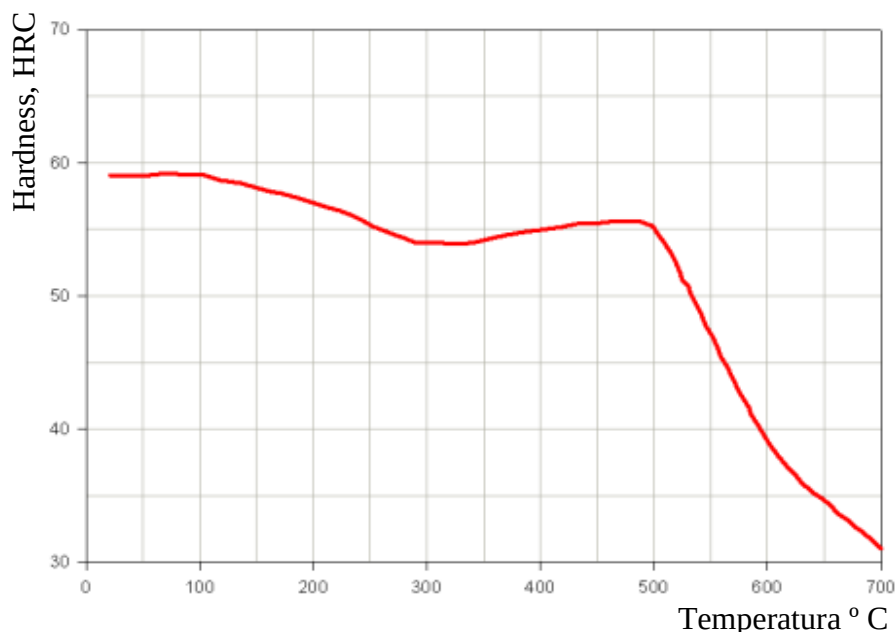


Figura 95 - Curva de revenido para o aço 440 C (adaptado de [66]).

ANEXO B: Resultados da microanálise por raios X

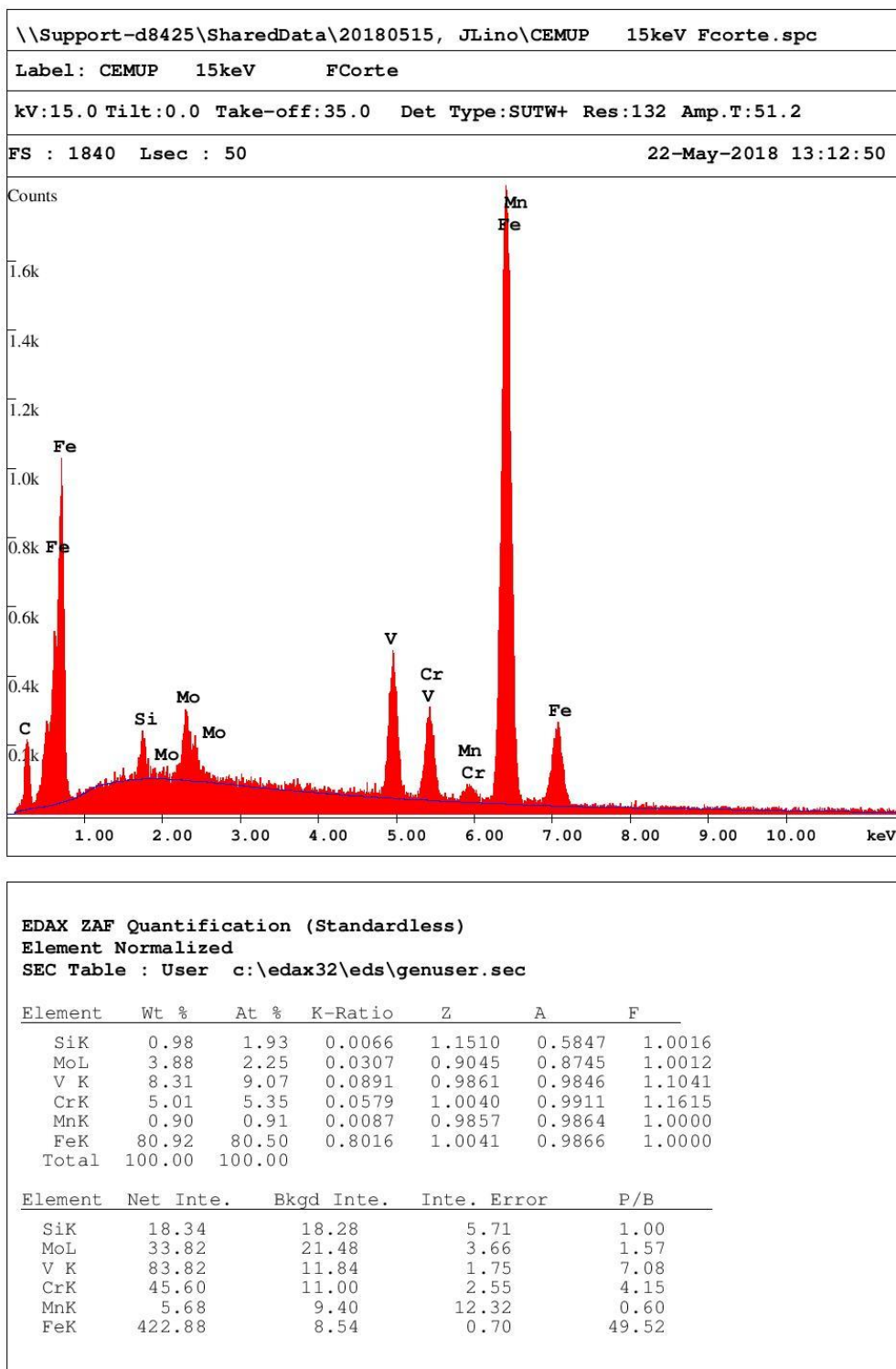


Figura 96 - Resultados da microanálise por raios X.

ANEXO C: Desenho técnico da ferramenta atual.

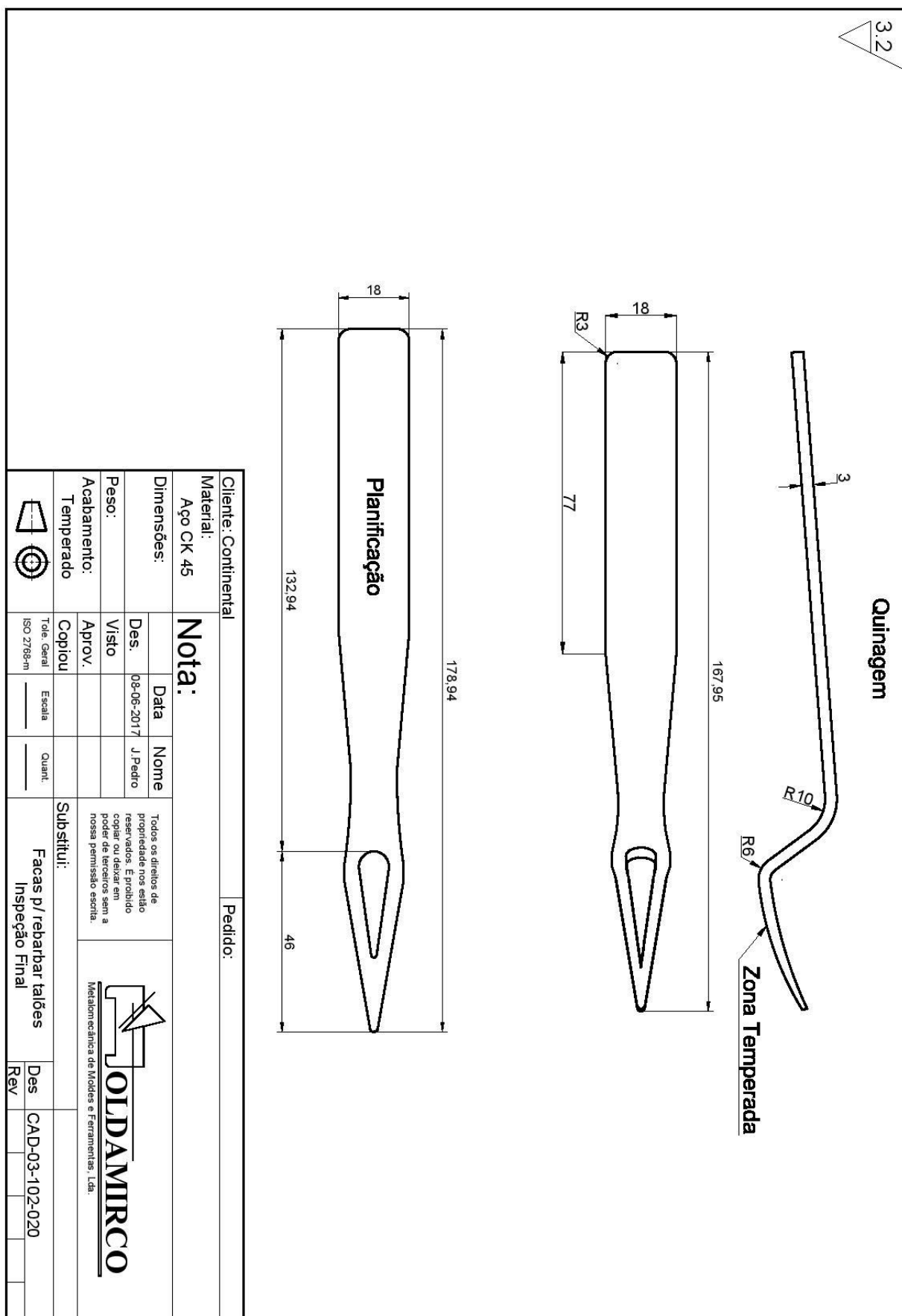


Figura 97 - Desenho técnico da ferramenta atual.

ANEXO D: Desenho técnico do protótipo da ferramenta porta lâminas.

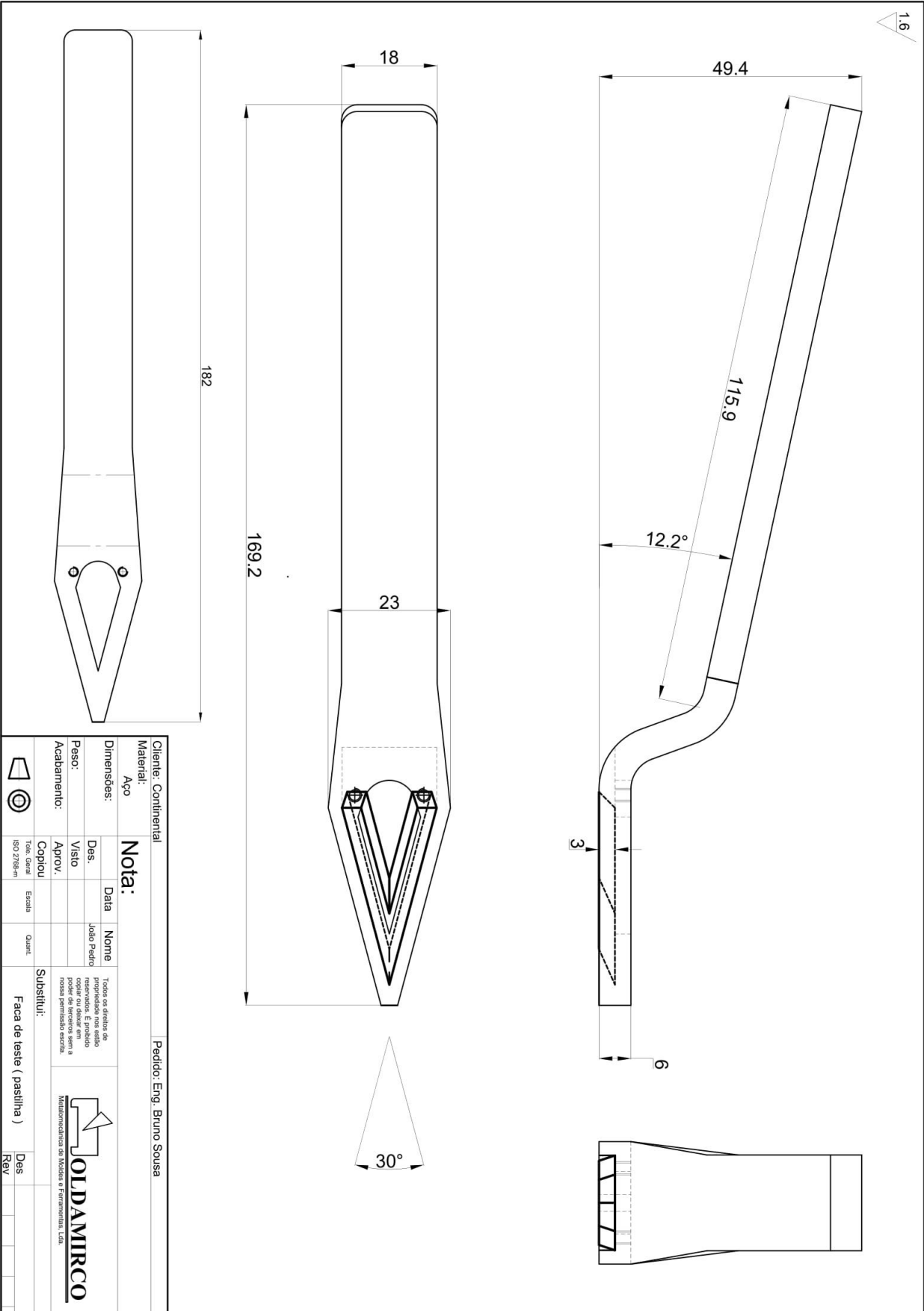


Figura 98 - Desenho técnico do protótipo da ferramenta porta lâminas.

ANEXO E: Desenho técnico da lâmina de corte para a ferramenta porta lâminas.

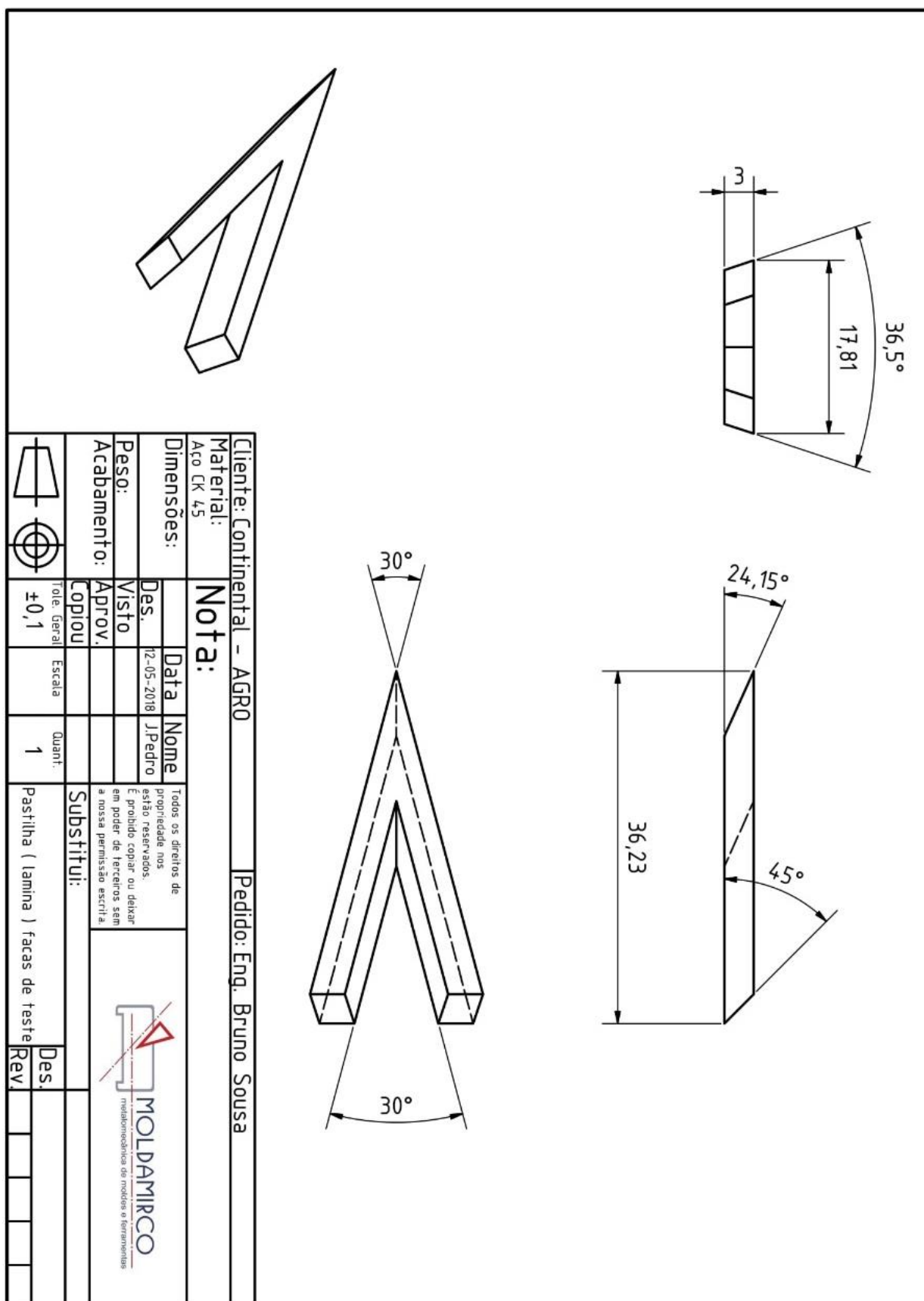


Figura 99 - Desenho técnico da lâmina de corte para a ferramenta porta lâminas.