



ipb

INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

**Estudo comparativo da vida útil das ferramentas e
acabamento superficial para diferentes ferramentas de
fresagem**

Daniel António Barros Pereira

Relatório da Dissertação Final apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Industrial

Área de especialização em Engenharia Mecânica

Outubro de 2017

**Estudo comparativo da vida útil das ferramentas e
acabamento superficial para diferentes ferramentas de
fresagem**

Daniel António Barros Pereira

Relatório da Dissertação Final apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Industrial

Área de especialização em Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor João Pinto Castro Ribeiro
Orientador: Professor Doutor Luís Miguel Cavaleiro Queijo

Outubro de 2017

A quem devo tudo. Aos meus pais.

Agradecimentos

Começo por dirigir os meus agradecimentos ao Professor Doutor João Ribeiro por toda a dedicação, conhecimento transmitido e pela sua constante disponibilidade para ajudar.

Agradeço ao Professor Doutor Luís Queijo pela contribuição e disponibilidade.

Agradeço ao meu “Orientador de Laboratório” Eng.º Jorge Paulo, por toda a ajuda que me prestou e conhecimento que partilhou comigo para a realização desta dissertação. Sem ele, este trabalho seria muito mais difícil.

Agradeço às empresas *Seco*® e *Palbit*® pelo fornecimento das ferramentas utilizadas neste trabalho.

Agradeço à *Fundição do Alto da Lixa, S.A. (FAL)* pela disponibilidade do ferro fundido branco usado nos ensaios experimentais.

Agradeço aos meus amigos que me acompanharam durante este percurso académico que, de uma forma ou outra, contribuíram para isto fosse possível.

Agradeço à minha namorada, Sara Flor, por todo o apoio, paciência e todos os conselhos que foram dados ao longo destes anos. Muito obrigado por ter acreditado e nunca me deixar desistir.

Por fim, aos mais importantes, os meus Pais. Nunca duvidaram de mim, fazendo os possíveis e impossíveis para que conseguisse chegar até aqui. Nunca conseguirei agradecer tudo o que fizeram e continuam a fazer por mim.

Resumo

Na indústria, um dos principais objetivos é conseguir uma produção a baixo custo, com um tempo de fabrico o mais curto possível e uma ótima qualidade de produto. Para isso, a indústria recorre às máquinas de comando numérico (CNC), conseguindo assim minimizar o tempo de maquinagem e obter uma elevada precisão.

Estas máquinas, CNC, podem ser aplicadas a diferentes processos de maquinagem, nomeadamente, torneamento, fresagem, furação, entre outros. Sendo o mais utilizado a fresagem, devido à sua versatilidade. Por norma, este processo é utilizado para maquinar materiais metálicos, como é o caso do aço e dos ferros fundidos.

Para melhorar estes tipos de processos de maquinagem, é necessário realizar estudos que mostrem qual a influência dos diferentes parâmetros no processo e que, concomitantemente, permitam escolher corretamente as ferramentas de corte mais adequadas para as operações de maquinagem. Neste trabalho estudou-se o efeito de quatro parâmetros do processo de fresagem (o tipo de pastilha, a velocidade de corte, o avanço e a penetração axial) na rugosidade superficial, no desgaste das pastilhas e na taxa de produção durante a maquinagem de um ferro fundido branco (de dureza 370 HB).

Para esta análise foram usados dois métodos de otimização: o método de Taguchi e a análise relacional de Grey. Com o método de Taguchi foi possível determinar a matriz dos ensaios experimentais efetuados neste trabalho (L18) e, posteriormente, determinar a combinação ótima de parâmetros para cada um dos elementos de controlo (rugosidade, desgaste das ferramentas e taxa de produção) individualmente, bem como, a influência dos parâmetros nesses elementos de controlo. A análise relacional de Grey foi utilizada para determinar a combinação ótima de parâmetros para o conjunto dos elementos de controlo.

O critério de paragem dos ensaios experimentais foi efetuado de acordo com a norma ISO 8688-1, e ocorreu quando as pastilhas atingissem um desgaste igual ou superior a 0.2 [mm]. Para cada paragem do ensaio foi medido o desgaste das pastilhas e a rugosidade superficial da peça. No final dos 18 ensaios experimentais, foi realizado um tratamento estatístico dos dados através da análise de variância (ANOVA), com o intuito de determinar a influência dos parâmetros na vida útil das ferramentas de corte, na rugosidade superficial da peça e na taxa de produção. O valor máximo de vida útil foi 222

[min], o valor mínimo da média da rugosidade foi 0,31 [μm] e o valor máximo da taxa de produção foi de 4,584 [cm^3/min].

Recorrendo à análise de variância foi possível verificar que os parâmetros que mais influenciaram para a vida útil, rugosidade e taxa de produção. Para o primeiro caso, para a vida útil, o parâmetro que mais influenciou foi o avanço, com 41,32 %, enquanto para a rugosidade o que mais influenciou foi o tipo de pastilhas, com o valor de 90,85 %. No último caso, na taxa de produção, existem três parâmetros que influenciam da mesma forma, a velocidade de corte, o avanço e a penetração axial com 33,33 %.

O segundo método usado foi a análise relacional de Grey que permitiu determinar a melhor combinação de parâmetros. Para realizar esta escolha foi necessário decidir, numa gama de 0 a 1, a importância que é dada à vida útil, à rugosidade superficial e à taxa de produção, sendo que para este estudo os três casos foram-lhes atribuídos 0,5. A melhor combinação obtida com este método foi: Pastilha 2, velocidade de corte igual a 150 [m/min], avanço igual a 0,1 [mm/dente] e a penetração axial de 0,3 [mm].

Abstract

In industry, one of the main objectives is to achieve low cost production with the shortest possible manufacturing time and excellent product quality. For this, the industry uses the numerical control (CNC) machines, thus managing to minimize the machining time and obtain a high precision.

These machines, CNC, can be applied to different machining processes, namely, turning, milling, drilling, among others. Being the most used milling, due to its versatility. As a rule, this process is used to machine metal materials, such as steel and cast irons.

In order to improve these types of machining processes, it is necessary to carry out studies that show the influence of the different parameters in the process and, at the same time, allow to choose the cutting tools most suitable for the machining operations. In this work the effect of four parameters of the milling process (type of insert, cutting speed, feed rate and axial depth) on the surface roughness, the wear of the tools and the production rate during the machining of a cast white iron (hardness 370 HB).

Two optimization methods were used for this analysis: the Taguchi method and the Gray relational analysis. With the Taguchi method, it was possible to determine the matrix of the experimental tests carried out in this work (L18) and later to determine the optimal combination of parameters for each of the control elements (roughness, tool wear and production rate) individually as well such as the influence of the parameters on these control elements. Gray relational analysis was used to determine the optimal combination of parameters for the control elements as a whole.

The stop criterion of the experimental tests was carried out in accordance with ISO 8688-1 and occurred when the inserts reached a wear and tear equal to or greater than 0.2 [mm]. For each stop of the test the wear of the pellets and the surface roughness of the part were measured. At the end of the 18 experimental tests, a statistical treatment of the data was performed through analysis of variance (ANOVA), in order to determine the influence of the parameters on the useful life of the cutting tools, the surface roughness of the piece and the production rate. The maximum lifetime value was 222 [min], the minimum value of the the arithmetic average was 0.31 [μm] and the maximum value of the production rate was 4.584 [cm^3/min].

With the use of the analysis of variance it was possible to verify that the parameters that most influenced the useful life, roughness and production rate. For the first case, for the useful life, the parameter that most influenced was the advance, with 41.32%, while for the roughness the most influenced was the type of inserts, with the value of 90.85%. In the last case, the production rate, there are three parameters that influence in the same way, the cutting speed, the advance and the axial penetration with 33.33%.

The second method used was Gray relational analysis that allowed to determine the best combination of parameters. In order to make this choice, it was necessary to decide, in a range of 0 to 1, the importance given to the useful life, the surface roughness and the production rate, and for this study the three cases were attributed 0.5. The best combination obtained with this method was: Table 2, shear rate equal to 150 [m / min], feed rate equal to 0.1 [mm / tooth] and axial depth of 0.3 [mm].

Índice

Agradecimentos	III
Resumo	V
Abstract.....	VII
Índice de Figuras	XIII
Índice de Tabelas	XV
Abreviaturas.....	XVII
Símbolos	XIX
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Resumo Histórico.....	3
1.3. Estrutura.....	7
2. Fundamentos Teóricos	9
2.1. Processos de fabrico com arranque de apara	11
2.1.1. Fresagem.....	11
2.1.2. Tipos de fresadoras	13
2.1.3. Centros de Maquinagem	14
2.1.4. Parâmetros de funcionamento na fresagem	15
2.2. Ferramentas de corte	16
2.2.1. Tipos de ferramentas de corte	17
2.2.2. Tipos de desgastes e avarias	17
2.2.3. Mecanismos de desgaste	19
2.2.4. Materiais das ferramentas de corte	20
2.3. Rugosidade Superficial	29

2.3.1.	Rugosímetro	30
2.4.	Método de Taguchi	31
2.4.1.	Função perda na qualidade de Taguchi.....	32
2.4.2.	Taguchi e razão sinal-ruído.....	32
2.5.	Análise relacional de Grey	33
3.	Ensaio Experimentais	35
3.1.	Ensaio preliminar	37
3.2.	Matriz ortogonal L18 pelo Método de Taguchi	39
3.3.	Materiais e ferramentas	43
4.	Resultados Obtidos	47
5.	Análise e Discussão dos Resultados	53
5.1.	Método de Taguchi	55
5.1.1.	Razão Sinal-Ruído	55
5.1.2.	Análise ANOVA.....	60
5.2.	Análise Relacional de Grey.....	61
5.2.1.	Análise ANOVA.....	65
5.2.2.	Confirmação dos Resultados.....	65
5.3.	Aparas obtidas nos ensaios experimentais	66
6.	Conclusões e propostas para trabalhos futuros	69
6.1.	Conclusões	71
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	72
	Referências	73
	Anexos.....	81
	Anexo A: Dados técnicos da CNC	83
	Anexo B: Dados técnicos da ferramenta de fresagem da Palbit®.....	84
	Anexo C: Propriedades das pastilhas da Palbit®	86

Anexo D: Dados técnicos da ferramenta de fresagem da Seco®	87
Anexo E: Propriedades das pastilhas da Seco®	88
Anexo F: Desgaste das pastilhas	90
Anexo G: Valores e média da rugosidade superficial	108
Anexo H: Valores da vida útil das ferramentas	109
Anexo I: Valores da taxa de produção.....	111
Anexo J: Microscópio utilizado.....	112
Anexo K: Rugosímetro utilizado.....	113

Índice de Figuras

Figura 1-Operação de fresagem: a) movimento de avanço; b) movimento principal ou de corte; c) curso útil de uma navalha [23].	11
Figura 2-Fresagem cilíndrica e fresagem frontal, adaptado de [23]......	12
Figura 3-Fresagem cilíndrica: a) fresagem a empurrar; b) fresagem a puxar [23]......	12
Figura 4-Exemplo de uma fresadora horizontal.[26].....	13
Figura 5-Exemplo de uma fresadora vertical [27]......	13
Figura 6-Exemplo de uma fresadora universal [28].	14
Figura 7-Centro de maquinagem vertical de 3 eixos. Marca: DMG MORI. Modelo:DMC 1450V [29]......	15
Figura 8- Representação a área fresada (ae). Adaptado de: Sandvik [30]......	16
Figura 9-Exemplo de diferentes tipos de fresas. Adaptado da Sandvik [32].	17
Figura 10-Diferentes degradações das ferramentas de corte, adaptado de [34].	18
Figura 11- Mecanismos de desgaste das ferramentas em função da velocidade de corte [23].	19
Figura 12- Ferramentas de corte de diferentes materiais. Adaptado da Sandvik.[38]....	21
Figura 13- Aplicação dos diversos materiais [4].	22
Figura 14- Ferramentas de corte de cermet.[38]......	26
Figura 15- Exemplos de ferramentas de corte de materiais ultraduros. A: CBN. B: PCD. Adaptado de [38]	28
Figura 16-Rugosímetro usado nesta dissertação. Marca: Mitutoyo.	31
Figura 17- Genichi Taguchi. Imagem retirada de [41]......	31
Figura 18- Função Perda de Taguchi. Adaptado de [44]......	32
Figura 19-Bloco de aço antes e após a maquinagem.....	38
Figura 20-Desgaste em 2 das 4 pastilhas utilizadas no ensaio 0.	38
Figura 21- Bloco de ferro fundido branco na mesa da CNC.	43

Figura 22-Realização dos apoios na fresadora de topo.	44
Figura 23-As duas medições de rugosidade superficial (unidades em mm).	45
Figura 24-Fresadora universal usada neste projeto. Modelo:Deckel Maho DMC 63V .	45
Figura 25- Pastilhas fornecidas pela Palbit e a sua devida colocação na ferramenta.	46
Figura 26-Pastilhas fornecidas pela Seco e a sua devida colocação na ferramenta.	46
Figura 27- Pastilha do ensaio 3 com apenas uma paragem.	49
Figura 28-Pastilha do ensaio 3 após a terceira paragem.....	49
Figura 29- Valor médio S/N para os diferentes níveis na vida útil das ferramentas.	57
Figura 30-Valor médio S/N para os diferentes níveis na rugosidade superficial.	58
Figura 31- Valor médio S/N para os diferentes níveis na taxa de produção.	60
Figura 32-Aparas de dois ensaios experimentais. A-Ensaio 3. B-Ensaio 16.	67

Índice de Tabelas

Tabela 1- Caraterísticas dos aços rápidos [23].	23
Tabela 2-Caraterísticas da deposição CVD e PVD [23].	23
Tabela 3- Caraterização dos grupos P, M e K.	24
Tabela 4- Combinações de revestimento mais comum, adaptado de [4].	25
Tabela 5- Caraterísticas do nitreto de boro cubico (CBN) e do diamante policristalino (PCD) [23].	28
Tabela 6- Indicação das classes e valores da rugosidade segundo a Norma ISO 1302..	30
Tabela 7- Composição química do aço 1.2738 [49].	37
Tabela 8-Valores do desgaste das pastilhas do ensaio preliminar.	39
Tabela 9- Valores fornecidos pela Palbit® e Seco®.	40
Tabela 10-Valores dos parâmetros, escolhidos para os diferentes níveis.	40
Tabela 11- Matriz L18 de Taguchi.	41
Tabela 12-Matriz L18 de Taguchi com os valores no formato dos fabricantes.	41
Tabela 13-Matriz L18 de Taguchi no formato do Sistema Internacional.	42
Tabela 14- Valores da vida útil obtidos nos ensaios.	50
Tabela 15-Valores obtidos nos ensaios para a rugosidade superficial.	51
Tabela 16-Valores obtidos nos ensaios para a taxa de produção.	52
Tabela 17- Valores da razão S/N para a vida útil das ferramentas de corte.	56
Tabela 18- Abreviaturas para os vários níveis dos parâmetros.	56
Tabela 19-Valores da razão S/N para a rugosidade superficial.	58
Tabela 20- Valores da razão S/N da taxa de produção.	59
Tabela 21- Valores da ANOVA para a vida útil das ferramentas.	60
Tabela 22- Valores da ANOVA para a rugosidade superficial.	61
Tabela 23- Valores da ANOVA para a taxa de produção.	61
Tabela 24- Valores da razão Sinal-Ruido.	62

Tabela 25- Valores da razão S/N normalizados para a análise relacional de Grey.	63
Tabela 26-Coeficiente relacional de Grey.	63
Tabela 27- Grau relacional de Grey e a devida ordem.	64
Tabela 28- Tabela de resposta para o grau relacional de Grey.....	64
Tabela 29-Valores da ANOVA para a análise relacional de Grey.	65
Tabela 30- Comparação entre os valores do processo inicial e o ótimo.	66

Abreviaturas

AISI – American Iron and Steel Institute

Al₂O₃ – Alumina / Oxido de alumínio

ANOVA – Análise estatística da variância

CBN – Nitreto de boro cubico

CN – Comando Numérico

CNC – Comando Numérico Computacional

CVD – Deposição química em fase de vapor

GRA – Grey Relational Analysis

HB - Brinell

ISO – *Internacional Organization for Standardization*

MRR – Taxa de material removido

NbC – Carboneto de Nióbio

PCD – Diamante sintético policristalino

PVD – *Physical Vapor Deposition*

SiC – Carboneto de Silício

TaC – Carboneto de Tântalo

TiC – Carboneto de Titânio

TiN – Nitreto de Titânio

V₄C₃ – Carboneto de Vanádio

WC – Carboneto de Tungstênio

Símbolos

a_e – Área fresada

a_p – Profundidade de corte

Df – Graus de liberdade

f_z – Avanço por dente

MS – Média dos quadrados

Valor F – ferramenta estatística

VB – Desgaste de flanco

V_c – Velocidade de corte

V_f – Velocidade de avanço

R_a – Rugosidade média

S/N – Razão Sinal-Ruído

SS – Soma dos quadrados

Z_n – Número de dentes

1. Introdução

1.1. Objetivos

Esta dissertação tem como principais objetivos:

- Caracterizar a influência de alguns parâmetros de maquinagem na rugosidade superficial de peças maquinadas, na vida útil das ferramentas de corte e na taxa de produção.
- A determinação da combinação ótima de parâmetros de maquinagem para minimizar a rugosidade superficial das peças maquinadas, maximizar a vida útil das ferramentas de corte e da taxa de produção. Neste objetivo pretende-se determinar a combinação ótima para cada fator de controlo individual.
- A determinação da combinação ótima de parâmetros de maquinagem para, simultaneamente, minimizar a rugosidade superficial das peças maquinadas, maximizar a vida útil das ferramentas de corte e da taxa de produção. Neste caso, será necessário encontrar um equilíbrio que permita otimizar todos os parâmetros, o que significa que, a combinação encontrada, provavelmente não será a ótima para cada um dos fatores de controlo individuais.

Para alcançar estes objetivos foram utilizados dois métodos de otimização, o método de Taguchi e a análise relacional de Grey. Pelo método de Taguchi são definidos os parâmetros de maquinagem, assim como os seus níveis, bem como a matriz ortogonal que indica as combinações para os ensaios experimentais. Para a análise dos valores obtidos no método de Taguchi, é necessário utilizar um método de análise estatística (ANOVA). Com a análise relacional de Grey, utiliza-se os valores obtidos em Taguchi e, de acordo com a importância dada aos fatores a estudar (rugosidade, vida útil e taxa de produção), é possível determinar qual a melhor combinação de parâmetros.

1.2. Resumo Histórico

A revolução industrial, que teve início no Séc. XVIII no Reino Unido, surge na sequência da necessidade de substituir as ferramentas pelas máquinas, a produção caseira pela produção fabril e a substituição da energia humana pela energia motora.

Com o crescimento do comércio internacional coexiste um enorme aumento da riqueza, que possibilita um financiamento dos custos elevados associados às indústrias. Com isto,

começou a surgir um investimento em projetos, com o objetivo de aperfeiçoar as técnicas de produção e a criação de máquinas.

Posteriormente, foi verificado que o investimento de máquinas em grande quantidade originaria uma maior produtividade e com isso, maiores lucros para os empresários e investigadores.

Ao longo do XIX, outros países europeus seguiram o mesmo caminho em busca de riqueza e dos lucros promovidos pelos meios de produção [1]. A busca pela riqueza, seria uma consequência de uma constante evolução dos meios de fabrico, por exemplo. Em plena guerra civil na América, era urgente o fabrico de armas e Eli Whitney criou a primeira fresadora para a produção de peças para armas. Esta fresadora não possuía motor, então o movimento do eixo era através da rotação de um volante que trabalhava em função de um parafuso de rosca. Obviamente que com o passar do tempo, era cada vez mais importante que se adaptassem as máquinas para que, de algum modo, houvesse mais produção. Foi, exatamente por esta razão, que o americano Robert Johnson encontrou uma forma de adaptar o eixo da fresadora a uma roda de moinho de água, tornando assim o trabalho muito mais produtivo, tal como era pretendido. A necessidade de as fábricas terem produção em série, de modo a tornando-se assim, simultaneamente, mais produtivas e rentáveis levou a que Robbins e Lawrence, em 1848, criassem uma fresadora mais potente e precisa. Esta fresadora possuía um cabeçote vertical e também era equipada com motores a vapor, possibilitando uma maior série de trabalhos.

Após alguns anos, em 1862, o engenheiro Joseph R. Brown concebeu a primeira fresadora universal. Fundando assim umas das maiores fábricas de máquinas-ferramentas até hoje, a '*Brown & Sharpe*' [2].

Com este surgimento existiu a necessidade de melhorar as condições de maquinagem, para que, com isso, houvessem custos e tempos de produção mais reduzidos, podendo assim haver mais vantagens económicas e uma maior produtividade [3].

Para conseguirem melhores condições de maquinagem, foram surgindo investigações ao nível do corte de materiais metálicos por arranque de aparas. Destacando, nesta fase do século, o engenheiro Frederick Taylor que realizou estudos sobre novos materiais para as ferramentas, o desgaste e vida das mesmas e a determinação de condições de corte. Mais tarde, em conjunto com Maunsel White desenvolveram um modelo de aço rápido. Introduzindo também as primeiras curvas de vida para as ferramentas de corte [4].

A empresa *Krupp* iniciou a produção industrial de carbonetos sinterizados (metal duro) em 1926. Este fabrico foi baseado nas patentes de Lohman e Schoer. Estas patentes foram fornecidas à *General Electric Company* que, em 1928, lançou no mercado o metal duro da marca *Carboloy* [4].

Na Alemanha, durante a Segunda Guerra Mundial foi desenvolvida e comercializada a primeira pastilha de corte, constituída por um material cerâmico, a alumina ou óxido de alumínio [4,5]. Esta teve pouco sucesso, pois existia um problema de fixação da ferramenta de corte. Contudo, possuía boas propriedades de dureza e estabilidade química. Com o intuito de melhorar a qualidade das ferramentas, em 1969, surgem as primeiras pastilhas de metal duro revestidas a carbonetos de titânio [4]. Este revestimento é efetuado com recurso à tecnologia de deposição por vapor químico (CVD). Estas coberturas CVD têm uma boa adesão ao metal duro e uma alta resistência ao desgaste [6].

Na maquinagem, para além da vida das ferramentas, a qualidade superficial das peças maquinadas é um fator primordial para a qualidade do produto final. Assim, houve a necessidade de desenvolver processos e mecanismos que permitissem medir, com elevado rigor, a rugosidade das superfícies fabricadas. Na sequência desta necessidade, surge, em 1933, o primeiro rugosímetro. Este foi construído por Abbott e Firestone, dando assim um passo importante no começo da rugosimetria. Sendo esta a técnica mais utilizada na análise da microgeometria das superfícies técnicas, até aos dias de hoje [4].

Para que a produção fosse cada vez mais autónoma, foram realizados vários trabalhos de investigação em torno de protótipos de comando numérico (CN). Em 1973, foi comercializado, pela primeira vez, o controlo numérico por computador (CNC), pela empresa *Cincinnati Milacron* [4].

O surgimento da fresadora CNC foi um marco importante na indústria, pois permite uma enorme flexibilidade e versatilidade. Um dos fatores importantes é a capacidade de ter uma boa precisão, proporcionando um bom acabamento superficial. Além disso, o tempo de processamento é bastante baixo em comparação com os processos de maquinagem convencionais. Isto é bastante importante para a indústria, uma vez que é essencial fabricar, a baixo custo, produtos de alta qualidade num curto espaço de tempo [7].

A eficiência dos parâmetros de maquinagem tem sido um problema enfrentado pelas indústrias, tornando-se, por isso, tema de muitos estudos. Os parâmetros de maquinagem ótimos são de grande preocupação nos ambientes fabris, pois os custos de maquinagem

têm um papel fundamental na competitividade no mercado industrial. A maquinagem económica tem uma enorme importância essencialmente quando são utilizadas máquinas de controlo numérico [8].

No início de um projeto os engenheiros deparam-se sempre com dois tipos de problema: O primeiro é a determinação dos valores dos parâmetros que vão gerar a qualidade do produto desejado, atendendo às especificações técnicas; o segundo problema, é a capacidade de maximizar o desempenho da produção utilizando os recursos disponíveis [9]. O processo de maquinagem e a escolha de uma ferramenta de corte proporciona várias combinações de parâmetros, como a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a profundidade de corte. Cada combinação destes parâmetros, origina uma rugosidade da superfície maquinada e o desgaste da ferramenta de corte. No entanto, torna-se difícil decidir a melhor combinação que oferece um valor inferior de rugosidade superficial e uma maior vida da ferramenta de corte.

Sendo a qualidade da superfície maquinada, um parâmetro importantíssimo na qualidade de um produto, é necessário medir a rugosidade da superfície. Embora este parâmetro seja alcançado experimentalmente, são vários os estudos que procuram algoritmos matemáticos capazes de prever a rugosidade superficial no processo de maquinagem [9,10]. Por serem estudos demorados e dispendiosos, torna-se quase impossível a indústria utilizá-los.

As técnicas de otimização surgiram para minimizar o número de combinações de parâmetros, para que o número de ensaios experimentais seja reduzido. Nos últimos tempos, foram desenvolvidas várias técnicas de otimização para serem aplicadas à maquinagem [11]. Entre elas, as mais utilizadas são a lógica de fuzzy [12], o método de Taguchi [13,14], os algoritmos genéticos [15], a Análise Relacional Grey [16,17] e o método de resposta de superfície [18,19]. No trabalho descrito neste relatório foi usada a técnica de Taguchi e a análise relacional Grey para otimizar a superfície maquinada e estudar a vida útil das ferramentas de corte.

O método de Taguchi [20] possibilita a definição de matrizes ortogonais de experiências cuja combinação entre diferentes parâmetros permite a determinação da combinação ótima para um determinado fator de controlo, exemplo a rugosidade [21]. Este método está, normalmente, associado a ferramentas estatística, como a análise de variância

(ANOVA) que permite modelar alguma incerteza dos resultados experimentais do modo a estimar resultados futuros.

Na análise relacional Grey os parâmetros são avaliados de 0 a 1 perante a sua importância, possibilitando assim, a descoberta da melhor combinação de parâmetros. Esta ferramenta tem sido muito usada nos últimos anos, combinada com o Método de Taguchi [22].

1.3. Estrutura

O primeiro capítulo consiste em apresentar os principais objetivos, bem como um resumo histórico e uma breve descrição da estrutura do mesmo.

Após a introdução, no capítulo 2 encontram-se os fundamentos teóricos necessários para a realização deste trabalho. Esses fundamentos abordam o processo de maquinagem utilizado, nomeadamente a fresagem, as ferramentas de corte, a rugosidade superficial e, por fim, os métodos de otimização utilizados, o método de Taguchi e a análise relacional de Grey.

O terceiro capítulo, numa primeira fase, apresenta um ensaio experimental preliminar efetuado e, posteriormente, é apresentado o planeamento experimental utilizado. Por fim, numa terceira fase, são mencionados os materiais e ferramentas utilizados neste trabalho.

O capítulo 4 mostra os valores obtidos para a vida útil das ferramentas, para a rugosidade superficial e para a taxa de produção.

O capítulo 5 inclui a análise dos valores obtidos e umas breves considerações aos mesmos.

O capítulo 6 apresentam-se as conclusões obtidas neste trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são mencionadas todas as referências utilizadas nesta dissertação.

2. Fundamentos Teóricos

2.1. Processos de fabrico com arranque de apara

O termo maquinagem abrange vários processos de remoção do material indesejado, regra geral, sob forma de apara. A maquinagem possibilita a produção de peças complicadas, com geometrias complexas, bom acabamento superficial e um grande rigor dimensional.

Os processos de fabrico com arranque de apara mais utilizados na indústria são o torneamento, fresagem, aplainamento, furação e a serragem [23].

2.1.1. Fresagem

A fresagem é um processo de fabrico com arranque de apara, onde a ferramenta de corte é denominada por fresa e possui um movimento de rotação contínuo. Este movimento constitui o movimento principal ou de corte, enquanto a mesa de trabalho efetua o movimento de avanço [24]. Na Figura 1 encontram-se representados os principais movimentos da operação de fresagem.

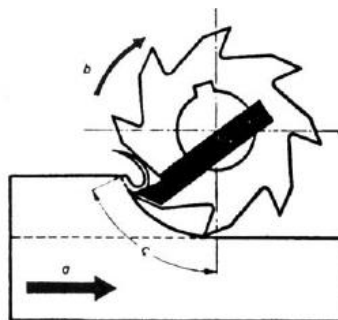


Figura 1-Operação de fresagem: a) movimento de avanço; b) movimento principal ou de corte; c) curso útil de uma navalha [23].

A fresagem pode realizar-se de dois modos diferentes, de forma cilíndrica ou de forma frontal. Na fresagem cilíndrica o eixo da fresa é paralelo à superfície de trabalho da peça (Figura 2). Na fresagem de topo (ou frontal) o eixo da fresa é perpendicular à superfície que se pretende maquinar (Figura 2) [25].

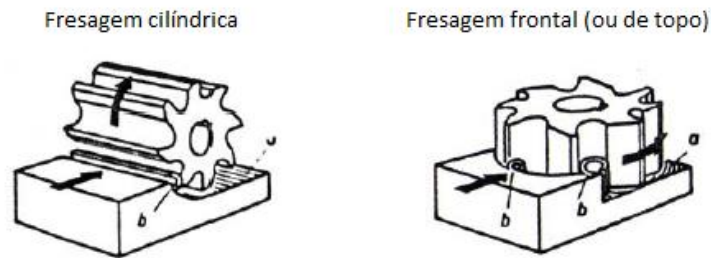


Figura 2-Fresagem cilíndrica e fresagem frontal, adaptado de [23].

Na fresagem cilíndrica existem dois processos de maquinagem, dependendo da maneira como a navalha penetra na peça a maquinar, e que são [23]:

- “A empurrar”’: este processo é o mais vulgar. As navalhas da fresa deslizam pela superfície que se trabalha, antes de penetrarem no material. Ou seja, a apara é arrancada inicialmente pela região mais fina. Ver Figura 3 a).
- “A puxar”’: neste processo as navalhas da fresa atacam a apara na parte mais espessa. A peça é fortemente comprimida contra o seu apoio, sendo assim usado na fresagem de peças delgadas e para grandes profundidades de corte. Ver Figura 3 b).

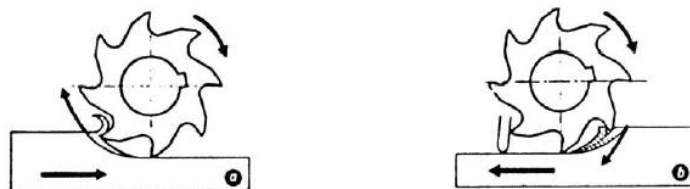


Figura 3-Fresagem cilíndrica: a) fresagem a empurrar; b) fresagem a puxar [23].

Confrontando estes dois tipos de fresagem é de indicar que na fresagem cilíndrica a fresadora suporta uma carga irregular em virtude da forma em vírgulas das aparas e, além disso, as superfícies maquinadas mostram-se ligeiramente onduladas. Na fresadora frontal cada navalha arranca uma apara de espessura uniforme pelo que a carga que a fresadora suporta é uniforme [23].

É de salientar também que na fresagem frontal o rendimento de corte da apara é geralmente de 15% a 20% mais elevado do que da fresagem cilíndrica. O acabamento superficial é superior com a fresagem frontal. Posto isto, sempre que seja possível, é aconselhado maquinar superfícies planas com a fresagem frontal [23].

2.1.2. Tipos de fresadoras

As fresadoras são máquinas ferramentas que podem ser usadas em diversas operações, tais como roscagem, abertura de ranhuras, superfícies planas, fabrico de engrenagens, entre outras. Podem ser divididas em 4 tipos, horizontais, verticais, universais e as especiais [23].

A fresadora horizontal (Figura 4) possui a árvore porta-fresas horizontalmente, servindo para todo o tipo de trabalhos de fresagem.



Figura 4-Exemplo de uma fresadora horizontal.[26].

Nas fresadoras verticais (Figura 5), a árvore porta-fresas está montada na posição vertical. Neste tipo de fresadora são executados, preferencialmente, trabalhos de fresagem frontal.



Figura 5-Exemplo de uma fresadora vertical [27].

As fresadoras universais (Figura 6) são máquinas que permitem posicionar a ferramenta segundo um dos eixos: vertical, horizontal ou oblíquo. Por norma, este tipo de fresadoras

apresentam um cabeçote articulado universal, possibilitando executar diversos trabalhos, tais como, a fresagem de ranhuras helicoidais [23], [25].



Figura 6-Exemplo de uma fresadora universal [28].

Com a finalidade de se realizarem operações especiais de fresagem, ainda são utilizados outro tipo de fresadoras, tais como a paralela, a de superfícies planas, a copiadora, a de roscas e a fresadora de rodas dentadas [25].

2.1.3. Centros de Maquinagem

Um centro de maquinagem (Figura 7) pode ser definido como uma fresadora CNC do tipo horizontal ou vertical equipada com uma porta ferramentas, que na mesma peça pode executar diferentes operações de maquinagem tais como, fresagem, furação, etc. Esta sequência de operações podem conter diferentes ferramentas e parâmetros de corte [25].

Os centros de maquinagem podem ser classificados em dois grupos [25]:

- Verticais: baixo custo, menos versáteis, e são usadas para maquinar apenas uma face de planos.
- Horizontais: Campo de aplicação maior, adequado para maquinar em mais que um plano.

Os centros de maquinagem de menor dimensão, a mesa dois movimentos, X e Y, enquanto nos de maior dimensão a coluna também se descola originando assim o terceiro eixo Z. Ainda é possível adicionar mais eixos para maquinagens mais complexas envolvendo mesas rotativas ou eixos secundários.



Figura 7-Centro de maquinagem vertical de 3 eixos. Marca: DMG MORI. Modelo:DMC 1450V [29].

2.1.4. Parâmetros de funcionamento na fresagem

Os principais parâmetros na fresagem são a velocidade de corte e a velocidade de avanço. A velocidade de corte (V_c) é definida pelo percurso efetuado por uma navalha da fresa, em [m/min]. Na maior parte das vezes é convertida na velocidade de rotação (n), pois a maioria das fresadoras usam a velocidade rotação por ser mais fácil de controlar. Ainda assim, os catálogos de ferramentas usam a velocidade de corte, por isso é sempre necessário relacionar estes dois parâmetros pela equação 1 [23].

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad \text{Equação [1]}$$

Onde:

- V_c = Velocidade de corte [m/min]
- D = Diâmetro da fresa [mm]
- n = Velocidade de rotação [rpm]

Relativamente à velocidade de avanço (V_f), esta é influenciada pela profundidade de corte, tipo de fresa, pela potência da máquina, qualidade de acabamento, material da fresa e da peça. A velocidade de avanço pode ser calculada pela equação 2 e com as unidades em milímetros por minuto [mm/min].

$$V_f = n \times Z_n \times f_z \quad \text{Equação [2]}$$

Onde:

- V_f = Velocidade de avanço [mm/min]
- n = Velocidade de rotação [rpm]
- Z_n = Número de dentes
- f_z = Avanço por dente [mm/t]

Outros parâmetros importantes no processo de fresagem são a profundidade de corte (penetramento), a taxa de remoção de material (MRR) e o tempo de maquinagem.

A produtividade na fresagem consiste na velocidade de processamento da máquina durante um período de tempo. Esta produtividade é normalmente definida como taxa de remoção de material (MRR) e pode ser calculada com ajuda da equação 3, onde a_e é a largura fresada, a_p representa a profundidade de corte e V_f é a velocidade de avanço, na Figura 8 pode observar-se, esquematicamente, os parâmetros referidos. Normalmente, a taxa de remoção de material (taxa de produção) é apresentada em [cm^3/min] [30].

$$Tp = \frac{a_e \times a_p \times V_f}{1000} \quad \text{Equação [3]}$$

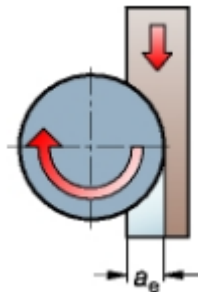


Figura 8- Representação a área fresada (a_e). Adaptado de: Sandvik [30].

A profundidade de corte é um parâmetro que é apresentado em milímetros e, na fresagem, é dividido em dois sentidos: axial e radial. Neste trabalho só é usada a penetração axial, que varia de 0.1 a 0.3 [mm], para as ferramentas em análise.

2.2.Ferramentas de corte

A otimização dos processos de maquinagem depende, entre outros fatores, da eficiência das ferramentas de corte. Esta eficiência consiste na escolha correta do material da ferramenta, da geometria apropriada e a aplicação das condições de corte apropriadas.

Com estes parâmetros é possível determinar a vida útil da ferramenta de corte que, posteriormente, é usado para realizar a sua substituição ou afiamento.

O tempo de vida útil da ferramenta de corte é definido como o tempo de corte efetivo das suas arestas de trabalho antes que seja necessário afia-la ou substitui-la [25].

2.2.1. Tipos de ferramentas de corte

A fresadora é uma das máquina-ferramenta mais versátil da maquinagem, mas isto deve-se essencialmente à vasta variedade de ferramentas de corte. Uma fresadora que não possuísse algum objeto de corte seria uma máquina sem utilidade [31].

Segundo Davim *et al.* [25], existe uma imensa variedade fresas para maquinagem, conforme a operação que se pretende realizar. Com isto, é possível encontrar-se fresas porta pastilhas de facejamento, de topo e de disco, e as fresas inteiriças de forma, cilíndrica, de topo ou de acabamento, de topo direito de ranhura, de ripa de topo esférico. Na Figura 9 pode observar-se alguns exemplos de tipos fresas vulgarmente utilizados na fresagem.



Figura 9-Exemplo de diferentes tipos de fresas. Adaptado da Sandvik [32].

2.2.2. Tipos de desgastes e avarias

O processo de degradação das ferramentas de corte ocorre sempre, a curto ou longo prazo, por muito duras e de elevada resistência ao desgaste que sejam. O estudo e a compreensão deste processo é bastante importante, pois pode prevenir desgastes antecipados das ferramentas, aumentando assim a produtividade [33].

A eficácia da ferramenta de corte pode ser comprometida devido dois processos: as avarias e o desgaste. O primeiro caso é um fenómeno que ocorre de maneira inesperada e existem 3 formas: as roturas frágeis da aresta de corte (lascamento) ou da ponta, a deformação plástica e as fissuras em pente. O segundo processo, é conduzido pela remoção sucessiva de material de zonas localizadas na face de ataque ou na face de saída da ferramenta [4]. Na Figura 10, estão apresentadas as principais formas de degradação de ferramentas.

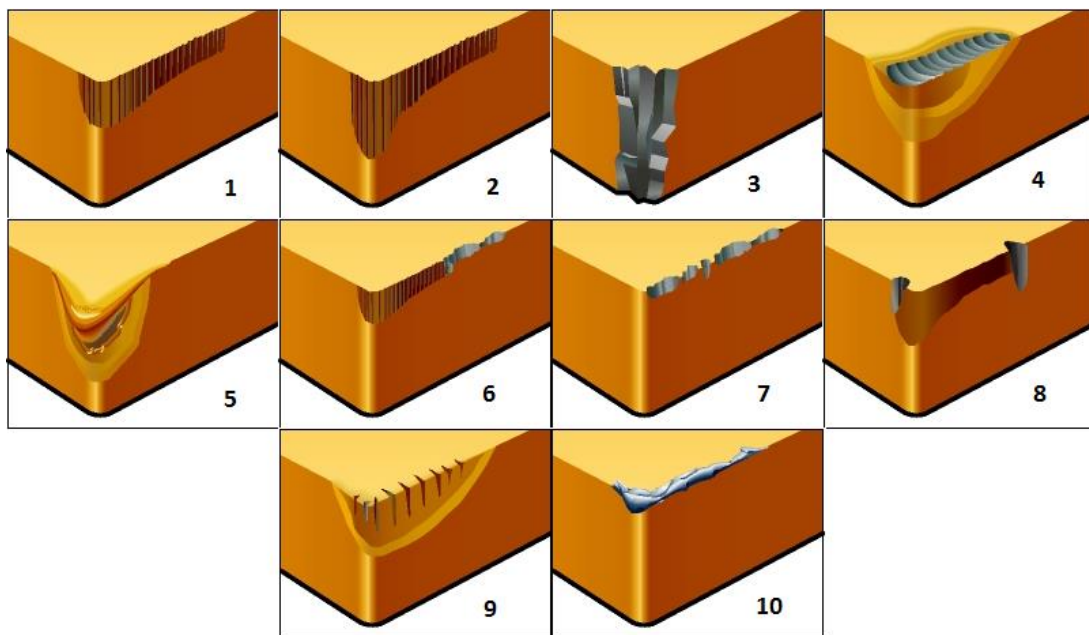


Figura 10-Diferentes degradações das ferramentas de corte, adaptado de [34].

Como é visível na Figura 10, a degradação das ferramentas de corte pode manifestar-se de diferentes formas. Os primeiros três casos da Figura 8 representam diferentes desgastes de flanco, este fenómeno ocorre devido ao desgaste abrasivo e é, geralmente, o tipo mais normal de desgaste. A situação ideal é conseguir manter um desgaste progressivo seguro, não deixando o desgaste chegar a um nível exagerado, pois causará uma elevada rugosidade na peça de trabalho e imprecisão dimensional.

A formação de cratera, como é visível na situação 4 da Figura 10 é devida aos mecanismos de desgaste por abrasão e difusão. De salientar o quinto caso, a deformação plástica, que por vezes é colocada à parte das avarias e desgaste, pois não existe concretamente remoção de material da ferramenta, mas sim uma mudança da geometria da aresta de

corte. Os casos 6 e 7 consistem na quebra da aresta de corte, isto pode acontecer devido ao corte descontínuo. Por vezes podem surgir entalhes como é visível no caso 8, este tipo de desgaste afeta a textura da superfície maquinada e, por norma, enfraquece a aresta de corte [35].

O caso 9 representa as fendas térmicas, que como o nome indica são causadas devido a variações de temperatura na fresagem. Quando é utilizado fluido de corte, podem ocorrer estas fissuras, devido ao fluido ampliar a variação de temperatura. A situação 10 representa uma aresta postiça, normalmente formada por material da peça de trabalho soldada à aresta de corte [35].

Para este tipo de estudos é fundamental a consulta da norma ISO 8688-1 que aborda os tipos de desgaste para as ferramentas de corte no processo de fresagem. Esta norma também possui os critérios para classificar o desgaste da ferramenta [36].

2.2.3. Mecanismos de desgaste

Os mecanismos principais que causam desgaste na face de ataque e na face de saída são os de abrasão, adesão, difusão e oxidação. Estes mecanismos podem atuar de forma individual ou combinada [4]. A Figura 11 representa o desgaste em função da velocidade, para os diferentes mecanismos de desgaste.

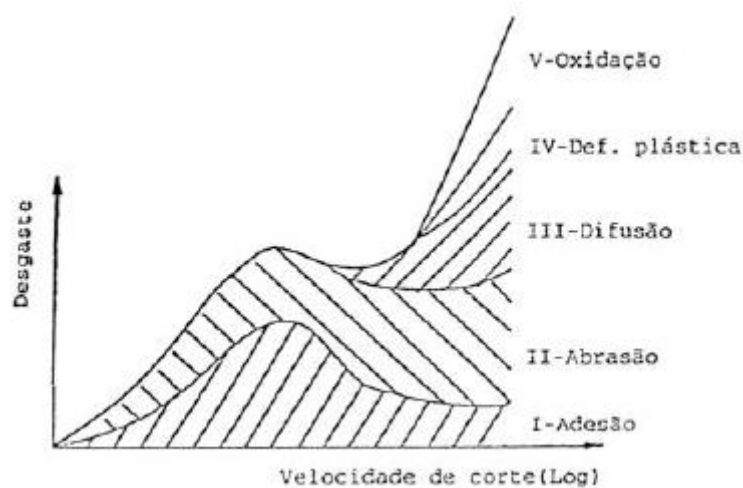


Figura 11- Mecanismos de desgaste das ferramentas em função da velocidade de corte [23].

O desgaste abrasivo ocorre por ação de partículas duras entre duas superfícies em deslizamento. Essas partículas duras podem ser da origem do desgaste da ferramenta de corte, ou inclusões duras na peça de trabalho ou ainda, desagregação em fragmentos da aresta postiça de corte. Estas partículas entram no material da ferramenta de corte devido à sua dureza e à pressão de contacto. Por fim, é permitido referir que quanto menor for a dureza do material da ferramenta, maior é a abrasão [23].

O fenómeno de desgaste por adesão ocorre quando existe aderência entre a peça e a ferramenta na face de ataque, e entre a peça e a ferramenta na face de saída [4]. Esta adesão ou soldadura é devido aos metais serem forçados a entrar em contacto sob alta pressão e a uma elevada temperatura [37].

A difusão entre dois materiais deve-se às diferenças de concentração química dos diferentes elementos na estrutura do material. Também pode ser considerado um processo de ativação térmica, sendo a influência mais visível a velocidades de corte elevadas. A difusão proporciona o desgaste das ferramentas de corte segundo dois aspetos distintos, de forma direta e de forma indireta. O primeiro é devido da perda de elementos químicos da ferramenta que se difundem para a peça de trabalho. O segundo, forma indireta, é pelo enfraquecimento da estrutura da ferramenta em consequência dessa perda e/ou da formação de ligas com os elementos que se difundem da peça ou peça para a ferramenta [23].

Relativamente à oxidação, pode ser verificado em algumas zonas da ferramenta de corte. Normalmente é devido ao elevado aquecimento da ferramenta de corte e à influência do meio onde vai realizar-se a maquinagem. Este mecanismo de desgaste atua de forma mais destacada a altas velocidades de corte e quando o material da ferramenta é constituído por aço rápido ou alguns tipos de carbonetos sinterizados. A oxidação também pode ter alguma influência no desgaste dos cerâmicos [23].

2.2.4. Materiais das ferramentas de corte

Existem diferentes materiais para ferramentas, Figura 12, contudo, a escolha de materiais adequados à realização de ferramentas de corte por arranque de peça é bastante importante na execução de uma operação de maquinagem adequada, não só a nível tecnológico mas também a nível económico. Uma escolha errada do material pode levar ao fracasso da ferramenta e da peça a maquiñar, causando custos de produção

desnecessários. Ainda assim, para obter um material com as características adequadas ao fabrico de ferramentas de corte só é possível analisando um conjunto de propriedades físicas (mecânicas) e químicas e, como é óbvio, a sua evolução com a temperatura de serviço e os critérios das funções a desempenhar [4].



Figura 12- Ferramentas de corte de diferentes materiais. Adaptado da Sandvik.[38].

As principais características das ferramentas de corte, sendo em maior em menor grau, são a elevada resistência ao desgaste, a elevada dureza a frio e a quente, elevada tenacidade, baixo coeficiente de atrito, elevada condutividade térmica e um baixo coeficiente de dilatação [4].

O material “ideal” deveria combinar uma elevada resistência à deformação do gume com uma elevada resistência ao desgaste, a frio e a quente, e uma tenacidade apropriada às discontinuidades de corte. Porém, é impossível satisfazer estas condições simultaneamente num só material pois, muitas vezes, são contraditórias. Posto isto, como não é possível a obtenção deste material “ideal”, é aconselhado selecionar um material que apresente as características mais adequadas para a situação em causa [4]. Na Figura 13 pode observar-se o campo de aplicação de diferentes materiais para ferramentas em função dos parâmetros de maquinagem utilizados e propriedades dos materiais.

Os metais para as ferramentas de corte por arranque de apra podem ser agrupados nas seguintes categorias:

- Aços rápidos
- Carbonetos sinterizados (metal duro)
- “Cermets”
- Cerâmicos

- Ultraduros

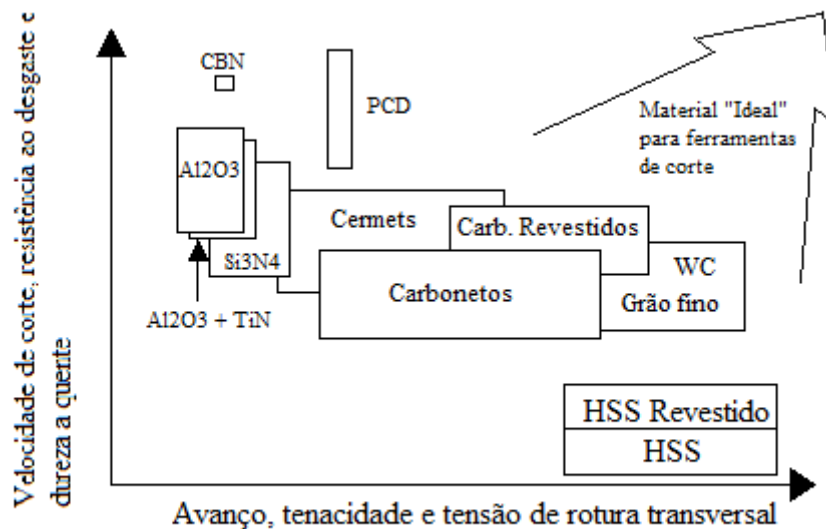


Figura 13- Aplicação dos diversos materiais [4].

a. Aços rápidos

O principal motivo de utilização de aços rápidos é a combinação de resistência ao desgaste e a sua tenacidade. Segundo a AISI (*American Iron and Steel Institute*), os aços rápidos são classificados em duas categorias: aços rápidos ao tungsténico (Grupo T) e aços rápidos ao molibdénio (Grupo M) [4].

Existem limitações no uso das ferramentas em aço rápido, nomeadamente, as velocidades de corte e dos avanços são inferiores às ferramentas de carbonetos sinterizados e com as ligas fundidas [23]. No entanto, no caso de ferramentas de forma complexa, como é o caso das brocas e algumas fresas, não parece possível eliminar completamente as ferramentas em aço rápido [4]. Na Tabela 1 apresentam-se as principais características mecânicas dos aços rápidos.

Nos últimos tempos, as ferramentas de aço rápido têm sido sujeitas a dois tipos de desenvolvimentos com o intuito de aumentar a dureza superficial e a resistência ao desgaste. Esses desenvolvimentos consistem em fabricar ferramentas através da pulverometalurgia (prensagem e sinterização) e o segundo progresso consiste em revestimentos através de deposição química em fase de vapor (CVD) e deposição física em fase de vapor (PVD) [4].

Tabela 1- Características dos aços rápidos [23].

Caraterísticas
<ul style="list-style-type: none"> • Teor em carbono: 0.7 % a 1.55% • Bom compromisso entre a resistencia ao desgaste e a tenacidade • Conservam a dureza até temperaturas da ordem dos 500°C a 600°C. Permitindo, desta forma, o torneamento com elevadas velocidades de corte. • Boas características para serem maquinados e forjados (isto quando o material ainda está no estado de recozido). • São materiais de tratamento térmico (têmpera e revenido) tal como os aços ao carbono. • Maior temperabilidade do que os aços ao carbono. Logo, implica uma maior resistência mecânica em secções maiores e menor empenamento e fissuração na têmpera.

Na Tabela 2, indica-se, de forma sucinta, algumas das características mais relevantes dos processos de deposição CVD e PVD.

Tabela 2- Características da deposição CVD e PVD [23].

Caraterísticas da Deposição Química em Fase de Vapor (CVD)
<ul style="list-style-type: none"> • Altas temperaturas de processamentos • Ligação substrato/revestimento insatisfatória • A espessura não é uniforme • Elevados custos das instalações de deposição (CVD)
Caraterísticas da Deposição Física em Fase de Vapor (PVD)
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatutas de processamento de aproximadamente 500°C, não afetando assim o substrato de aço rápido tratado termicamente • Boa ligação substrato/revestimento • Espessura uniforme

A pulverometalurgia é aplicada na produção de algumas qualidades de aço, utilizando processos de difusão realizados a altas pressões e temperaturas elevadas, e usando pós metálicos de elevada pureza, obtendo assim aços isentos de segregações [39]. As partículas desses pós possuem de 50 a 500 [µm] de diâmetro. A via da pulverometalurgia permite um fabrico de ferramentas de corte quase com a forma final, poupando operações de maquinagem [23].

Os revestimentos são formados por componentes de elevada resistência ao desgaste, dureza a quente e frio e estabilidade química. Eles melhoram as propriedades das ferramentas, preservando a tenacidade do aço rápido. Os tipos de revestimentos usados são o Nitreto de Titânio (TiN), Carboneto de Titânio (TiC), Carboneto de Tungsténio (WC) e Alumina (Al₂O₃) [23].

Perante as características acima referidas, é possível dizer que o processo CVD é inadequado para este caso. Enquanto a deposição física em fase de vapor possuiu as seguintes vantagens [23]:

- Aumento da vida de ferramentas para as mesmas condições de corte.
- Aumento da velocidade de corte, para a mesma vida, implicando uma diminuição do tempo de corte e melhoria do acabamento superficial das peças maquinadas.
- Coeficiente de atrito menor, levando a uma menor tendência à adesão, corte mais estável com forças de corte menores e vibrações menores.

b. Carbonetos sinterizados (metal duro)

As ferramentas de carbonetos sinterizados são as mais aplicadas, atualmente, na indústria, isto devido à sua variedade de combinações de dureza a quente e frio, resistência ao desgaste e à tenacidade. Estas ferramentas são obtidas através da pulverometalurgia (metalurgia em pó) e são constituídas por um carboneto muito duro e por um elemento aglomerante, o carboneto é geralmente o carboneto de tungstênio (WC) que pode mostrar-se sozinho ou associados com outros carbonetos, carboneto de titânio (TiC), carboneto de vanádio (V_4C_3), carboneto de nióbio (NbC) e o carboneto de tântalo (TaC). Estes carbonetos garantem a dureza a quente e a resistência ao desgaste. Em relação ao elemento aglomerante, normalmente é o cobalto pois permite a união das partículas duras (carbonetos) e é responsável pela tenacidade do material [4].

Segundo a ISO (*Internacional Organization for Standardization*) os carbonetos sinterizados podem ser agrupados em três categorias [23], tal como se pode observar na Tabela 3.

Tabela 3- Caracterização dos grupos P, M e K.

Grupo P	Grupo M	Grupo K
<ul style="list-style-type: none"> • Usado na maquinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam aparas longas e dúcteis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Usado na maquinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam aparas longas ou curtas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Usado na maquinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam aparas fragmentadas e materiais não metálicos.

A escolha da classe depende do tipo de operação de maquinagem (grandes avanços, corte descontínuo, etc), da velocidade de corte (aumento da velocidade de corte aumenta a

temperatura), das condições da máquina-ferramenta (problema de vibrações), do tipo de ferramentas (pastilha soldada ou pastilha fixa mecanicamente) e por fim, da geometria da ferramenta [23].

Como as ferramentas de aços rápidos, as ferramentas de carbonetos sinterizados podem ser revestidas. Na Tabela 4 é possível verificar combinações de revestimentos mais vulgares [4].

As ferramentas de carbonetos convencionais ou revestidos em comparação com os aços rápidos permitem uma maior taxa de remoção de avara, velocidades de corte superiores proporcionando um melhor acabamento superficial, um tempo de maquinagem inferior e uma maior vida útil da ferramenta, levando a uma redução dos custos de substituição ou afiamento [4].

Tabela 4- Combinações de revestimento mais comum, adaptado de [4].

Tipo de Carboneto do substrato	Revestimentos						
	TiC	TiN	TiC Ti(CN) TiN	Al ₂ O ₃	TiC Al ₂ O ₃	TiC TiN Al ₂ O ₃	HfN
M 15	•		•	•	•	•	•
P 25	•	•	•				•
P 40	•		•				
K 10	•	•	•		•		

c. Cermet

O aparecimento das ferramentas de cermet foi devido, em primeiro lugar, à confirmação que a adição de TiC aumentava muito a resistência ao desgaste dos metais duros, quando se maquina aços. O segundo motivo foi devido à escassez de tungstênio durante a Segunda Guerra Mundial, que levaram os investigadores a desenvolver um material semelhante com as características do metal duro [33].

São adequados a desgastes ligeiros e acabamentos de aços ao carbono e ligados, sendo inadequados para grandes desgastes e para maquinagem de ligas não ferrosas (como por exemplo Al e Cu) [23]. Na Figura 14 apresentam-se alguns exemplos de ferramentas de corte fabricadas em cermet.



Figura 14- Ferramentas de corte de cermet.[38].

Os “cermets” são formados por agregados de cerâmica (TiC, TiN, WC, TaC, NbC) numa matriz metálica (Cobalto, Níquel ou Molibdénio) e tem as seguintes vantagens perante carbonetos sinterizados [23]:

- Menor coeficiente de atrito devido ao alto teor de TiN.
- Maior resistência à oxidação por causa da elevada estabilidade química do TiC.
- Maior dureza a quente.
- Menor tendência de adesão
- Velocidade de corte superior aos carbonetos sinterizados, porém menor que a dos cerâmicos.

d. Cerâmicos

Os materiais cerâmicos mais usados para as ferramentas de corte são a alumina branca (Al_2O_3) e a mistura de alumina branca com carboneto de titânio (TiC). Este material apresenta uma elevada dureza a quente, elevada resistência à formação de cratera, baixa condutividade térmica e muito baixa tenacidade, esta última obriga a que limite as aplicações para este material restringindo-se ao torneamento. Contudo, é um material que permite elevadas velocidades de corte e possibilita um bom acabamento superficial. Não

é aconselhado usar baixas velocidades e é inadequado ao corte de ligas de alumínio, titânio e magnésio [23].

Os materiais cerâmicos podem ser divididos em 3 grupos: cerâmicos à base de alumina, cerâmicos à base de nitreto de silício e por ultimo, cerâmicos reforçados com fibras. Este último grupo consiste no reforço de óxidos e nítretos com fibras de carboneto de silício (SiC), porém este material encontra-se em fase de ensaios, mas tem excelentes resultados na maquinagem de aço e ligas de níquel (Nimonic), tendo uma enorme obstáculo: risco de inalação com graves consequências para a saúde.

Os cerâmicos puros são ferramentas constituídos basicamente por grãos de Al_2O_3 , (“alumina branca”) possuindo uma elevada dureza, resistência ao desgaste e uma ótima estabilidade química, embora tenham uma baixa tenacidade e são utilizados, normalmente, no acabamento de materiais fundidos e em aços tratados superficialmente ou totalmente temperados. A nível de maquinagem exigem máquinas de alta rigidez e isentas de vibrações [33].

Recentemente existiu uma evolução nas aluminas brancas que consiste na adição zircónia possuindo a designação comercial “ATZ” ($Al_2O_3-ZnO_2$). Esta evolução proporciona uma evolução na tenacidade, ainda assim, as ATZ não admitem grandes valores das condições de corte (velocidade de corte, avanço e penetramento). A sua área de aplicação são o desgaste e acabamento de ferros fundidos e no desgaste de aços de cementação [4].

Com o objetivo de melhorar a tenacidade e a condutividade térmica é acrescentado TiC, formando assim a alumina preta. É utilizada no acabamento médio e fino de aços e também no desgaste de ferros fundidos cinzentos e superligas de níquel [33].

O segundo grupo dos cerâmicos são os cerâmicos à base de nitreto de silício (Si_3N_4). Este material conserva melhor a dureza a elevadas temperaturas e possuem uma tenacidade superior aos cerâmicos tradicionais (à base de alumina). Aplicam-se em operações de torneamento e fresagem, principalmente na maquinagem de ferros fundidos, aços e ligas de níquel [4].

e. Ultraduros

Nesta seção de materiais duros, os mais essenciais são o nitreto de boro cubico (CBN), Figura 15 A, e o diamante sintético policristalino (PCD), Figura 15 B, ambos possuem

durezas extremamente elevadas. Na tabela 5 são apresentadas as características do nitreto de boro cubico e do diamante policristalino [23].

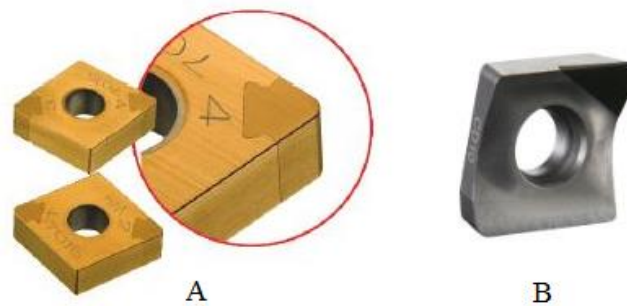


Figura 15- Exemplos de ferramentas de corte de materiais ultraduros. A: CBN. B: PCD. Adaptado de [38]

Tabela 5- Características do nitreto de boro cubico (CBN) e do diamante policristalino (PCD) [23].

CBN
<ul style="list-style-type: none">• Dureza a frio e a quente superior à dos cerâmicos e uma tenacidade superior à dos carbonetos.• Elevada condutibilidade térmica.• Boa estabilidade química e pequena afinidade com os aços;• Elevada resistência à oxidação.• Aplicado na maquinagem de materiais muito duros (ligas de cobalto e níquel, ferro fundido branco muito duro com adições de crómio e níquel de elevada abrasividade).
PCD
<ul style="list-style-type: none">• É o material para ferramentas mais duro.• As ferramentas PCD são as que apresentam a menor taxa de desgaste e a maior vida útil de todas as ferramentas.• Custo muito elevado (30 a 50 vezes o custo de pastilhas de carboneto sinterizado).• Não são aconselháveis para a maquinagem de ligas ferrosas.• São recomendados para a maquinagem de ligas de alumínio e no corte de materiais extremamente abrasivos (por exemplo compósitos de matriz metálica, plásticos reforçados com fibras de vidro, carbonetos de tungsténio e cerâmicos).• O seu elevado custo limita bastante o seu uso.

2.3. Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial é constituída de irregularidades finas ou erros microgeométricos resultantes do processo de corte. Essas imperfeições consistem em marcas de avanço, formação da aresta postiça de corte ou desgaste da ferramenta. A rugosidade da superfície maquinada depende de vários parâmetros, tais como, máquina-ferramenta, propriedades do material a maquinar, geometria e material da ferramenta e, por último, a operação de maquinagem [33].

Na indústria, a situação ideal seria obter uma superfície onde a rugosidade fosse zero, mas isso é impossível pois, mesmo escolhendo a melhor combinação de parâmetros, os processos de corte por arranque de apana causarão sempre imperfeições [4].

O parâmetro de rugosidade média é representado por R_a e a unidade de medida, no Sistema Internacional, é o micrómetro [μm] (1 micrómetro = 0.000001 m = 0.001 mm). Este parâmetro é utilizado, principalmente, nas seguintes condições [40]:

- Quando é necessário o controlo contínuo da rugosidade nas linhas de produção;
- Em superfícies que o acabamento apresenta pequenas saliências com a orientação bem definidas, como no caso da fresagem e torneamento.

De acordo com a Norma ISO 1302 existem duas alternativas para representar a rugosidade nos desenhos técnicos. A primeira consiste na representação do valor da rugosidade (μm) e a segunda consiste em indicar a classe de rugosidade. A Norma ISO 1302 estabelece 12 classes de rugosidade que variam de N1 a N12 e os valores da rugosidade média (R_a) podem variar entre 0.025 e 50 [μm], tal como observar na Tabela 6 [40].

Alternativamente, de acordo com a Norma DIN 4766, é possível dizer que os valores de rugosidade média variam de 0.012 a 50 [μm]. Estes valores variam dependendo do processo de fabrico utilizado na prática industrial [4].

A definição matemática para este parâmetro é dada pela equação 4:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad \text{Equação [4]}$$

Tabela 6- Indicação das classes e valores da rugosidade segundo a Norma ISO 1302.

Classe de Rugosidade	Valor de R_a (μm)
N12	50
N11	25
N10	12.5
N9	6.3
N8	3.2
N7	1.6
N6	0.8
N5	0.4
N4	0.2
N3	0.1
N2	0.05
N1	0.025

2.3.1. Rugosímetro

O rugosímetro é um aparelho eletromecânico (Figura 16) que é utilizado para medir a rugosidade superficial das peças maquinadas, garantindo assim se a superfície está em conformidade com os valores exigidos. A medição é feita por uma agulha que, em contato com a superfície e a uma velocidade constante, mede as irregularidades da superfície, gerando um gráfico com a rugosidade e/ou o valor em dígitos [40].

A rugosidade superficial é um dos fatores de controlo de qualidade mais importantes em processos de maquinagem. Na área do controlo de qualidade têm sido desenvolvidos várias metodologias que permitem garantir que um produto tenha a qualidade adequada para um determinado fim. Dessas metodologias tem-se destacado uma, que foi desenvolvida por Genichi Taguchi e que será apresentada nos capítulos seguintes.



Figura 16-Rugosímetro usado nesta dissertação. Marca: Mitutoyo.

2.4. Método de Taguchi

O método de Taguchi foi criado pelo engenheiro e estatístico Genichi Taguchi (1924-2012), Figura 17, nascido em 1924 em Tokamachi, no Japão. Ele foi o responsável por desenvolver uma metodologia que com a utilização de métodos estatísticos conseguia melhorar a qualidade de produtos industriais.



Figura 17- Genichi Taguchi. Imagem retirada de [41].

Em 1949, o *Electrical Communication Laboratory* da *Nippon Telephone & Telegraph Company*, com o objetivo de melhorar a qualidade as suas comunicações, contratou o Dr. Taguchi tornando-o responsável da produção e da qualidade. Dr. Taguchi começa assim a ter um forte impacto nas estatísticas industriais [42].

A filosofia de Taguchi tem consequências de longo alcance, mas é baseada em três conceitos simples e fundamentais. Toda a tecnologia e as técnicas surgem inteiramente a partir dessas três ideias. Esses conceitos são [43]:

- A qualidade deve ser projetada no produto e não inspecionada nele.
- A qualidade é melhor alcançada minimizando o desvio de um alvo. O produto deve ser concebido de forma a ser imune a fatores ambientais incontrolláveis.

- O custo da qualidade deve ser medido em função do desvio da norma e as perdas devem ser medidas em todo o sistema.

2.4.1. Função perda na qualidade de Taguchi

O conceito da “função perda” concebido pelo Dr. Taguchi é um conceito simples mas eficaz. Taguchi define a qualidade como “a perda total transmitida à sociedade a partir do momento que o produto é enviado para o cliente”. Apesar de ser uma ferramenta passiva, por si só, não proporciona melhorias no processo, proporciona mais efeitos nos produtos que qualquer outro método ou conceito [43]. A Figura 18 mostra o gráfico da função perda de Taguchi.

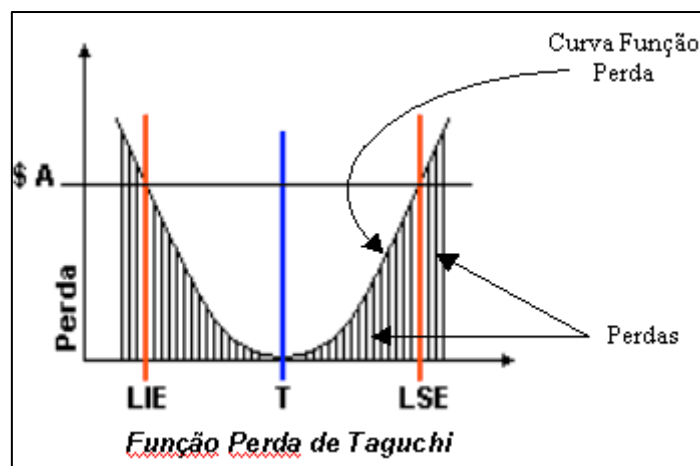


Figura 18- Função Perda de Taguchi. Adaptado de [44].

2.4.2. Taguchi e razão sinal-ruído

No método de Taguchi o termo “sinal” representa o valor desejável para a característica de saída e o termo “ruído” representa o valor indesejável. Taguchi usa a relação Sinal-Ruído para medir a característica de qualidade que se desvia do valor desejado [13]. A relação S/N é uma escala de medição que tem sido usada na indústria de comunicação por quase um século, mas o Dr. Taguchi generalizou o conceito da relação S/N aplicado na indústria da comunicação e aplicou-o para a avaliação de sistemas de medição, bem como, para a função de produtos e processos. Resumindo, quanto maior for a relação S/N melhor vai ser a qualidade [45].

A relação sinal-ruído mede a sensibilidade da característica de qualidade investigada, de uma maneira controlada, os fatores não controláveis (fatores de ruído). Este conceito de S/N foi concebido no campo da engenharia eletrotécnica. Do ponto de vista da qualidade, existem três categorias típicas de características de qualidade [43]:

- Nominal é o melhor;

$$S/N_T = 10 \times \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right) \quad \text{Equação 5}$$

- Maior é o melhor (maximizar);

$$S/N_L = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Equação 6}$$

- Menor é o melhor (minimizar);

$$S/N_S = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

\bar{y} – Média dos dados observados;

s_y^2 – Variância de y;

n – Número de observações;

y_i – Dados observados;

2.5. Análise relacional de Grey

A análise relacional de Grey é um método para medir o grau de aproximação entre as sequências usando um grau relacional de Grey. As teorias da análise relacional de Grey atraíram um interesse considerável entre os investigadores. Outros investigadores também examinaram a otimização dos parâmetros do processo [46].

A análise relacional de Grey consiste em utilizar os resultados experimentais, como a vida útil da ferramenta, a rugosidade da superfície e o material removido e inicialmente são

normalizados numa faixa entre zero e um, de acordo com a sua importância. De seguida, calcula-se o coeficiente relacional de Grey a partir dos dados experimentais normalizados para revelar a relação entre os dados experimentais desejados e os dados experimentais reais. Posteriormente, o grau relacional de Grey é calculado pela média do coeficiente relacional de Grey correspondente a cada resposta do processo. A avaliação global das respostas ao processo múltiplo baseia-se no grau relacional de Grey [47].

O processo desta análise também conhecida por “GRA” (*Grey Relational Analysis*) divide-se nos seguintes passos [48]:

- O primeiro passo é o pré-processamento de dados, com o objetivo de evitar o problema de escalas e unidades.
- Depois os dados experimentais são normalizados no intervalo entre zero e um.

$$x_{ij} = \frac{\eta_{ij} - \min_{ij}}{\max_{ij}\eta_{ij} - \min_{ij}\eta_{ij}} \quad \text{Equação 8}$$

- Em seguida, o coeficiente relacional de Grey ($\xi_i(k)$) é calculado a partir dos dados experimentais normalizados para expressar o relacionamento entre o ideal e os dados experimentais reais.

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}{|x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|} \quad \text{Equação 9}$$

- O grau relacional de Grey é, então, calculado pela média dos coeficientes relacionais de cinza correspondente a cada característica do desempenho.

$$\gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \omega_i \xi_{ij}(i) \quad \text{Equação 10}$$

- A análise estatística de variância (ANOVA) é realizada para os parâmetros de entrada com o grau relacional de Grey e os parâmetros que afetam significativamente o processo são descobertos.
- Os níveis ideais dos parâmetros do processo são escolhidos.

3. Ensaaios Experimentais

Ao longo deste capítulo é apresentado a configuração experimental baseada no Método de Taguchi e os respectivos ensaios experimentais. Numa primeira fase é apresentado um ensaio experimental preliminar, designado por “Ensaio preliminar”, onde o objetivo é estudar e analisar as condições de maquinagem limites que levem a um desgaste prematuro das ferramentas. Na segunda etapa são indicados os valores dos parâmetros de maquinagem e a construção da matriz ortogonal de Taguchi, com os valores dos parâmetros definidos. Por último, são apresentados os materiais e métodos de medição.

3.1. Ensaio preliminar

Antes de serem iniciados os ensaios experimentais pelos dois métodos de otimização que serão utilizados neste trabalho, foi necessário realizar um “Ensaio preliminar”. Este, teve como principais objetivos analisar, medir e interpretar o processo do desgaste progressivo das ferramentas, bem como, a influência dos parâmetros de corte nesse processo. Este estudo permitiu, também, definir os parâmetros de corte limites.

Para efetuar o ensaio foi utilizado um bloco de aço para molde (GMTC 1.2738), com dureza de 45 Rockell C. Na Tabela 7 é apresentada a composição química do aço.

Tabela 7- Composição química do aço 1.2738 [49].

Composição química (%)	
C	0,35-0,45
Si	0,20-0,40
Mn	1,30-1,60
P	Max 0,035
S	Max 0,035
Cr	1,80-2,10
Ni	0,90-1,20
Mo	0.15-0.25

O bloco referido anteriormente foi maquinado durante, aproximadamente, 30 minutos com uma fresa de quatro pastilhas e de acordo com uma trajetória circular, iniciando-se o corte no centro do bloco. As pastilhas foram fabricadas pela empresa *Palbit®* e têm a referência WNHU 04T310.

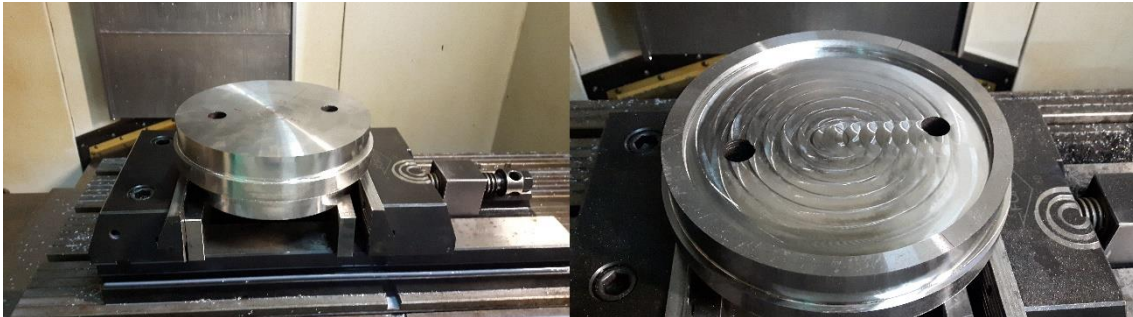


Figura 19-Bloco de aço antes e após a maquinagem.

Durante esse ensaio de maquinagem verificou-se a ocorrência do desgaste das pastilhas, como é possível ver na Figura 20. Os parâmetros de corte para este ensaio inicial, foram:

- Velocidade de corte = 300 [m/min]
- Avanço = 0,1 [mm/t]
- Penetração axial = 0,3 [mm]
- Penetração radial = 10 [mm]

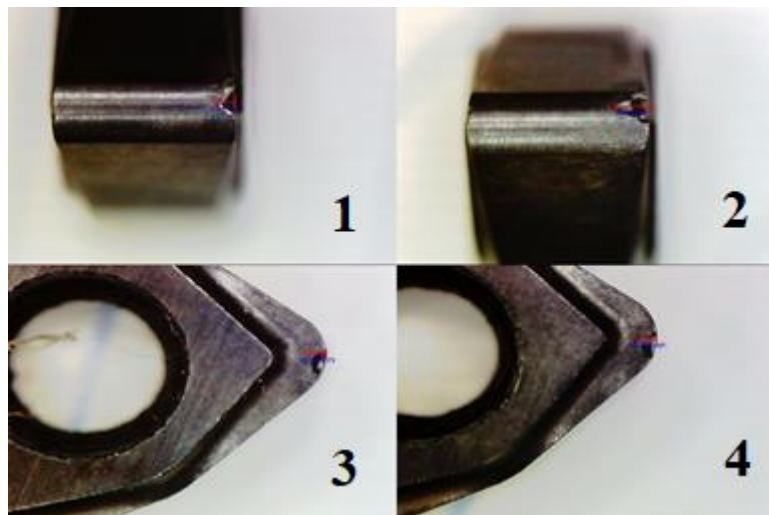


Figura 20-Desgaste em 2 das 4 pastilhas utilizadas no ensaio 0.

Devido à dificuldade de visualização dos valores nas quatro imagens, foi criada a tabela 8 para indicar os valores dos desgastes com a respectiva numeração da imagem.

Da tabela 8, pode verificar-se que três das quatro pastilhas tiveram um desgaste idêntico, de 0,275 [mm]. Contudo, a pastilha 2 teve um desgaste muito superior, 0,625 [mm], o que denota uma possível falta de equilíbrio da fresa ou que a condição de aperto desta pastilha foi diferente das outras pastilhas. Também se pode concluir que o tempo de vida das pastilhas testadas, para os parâmetros de maquinagem utilizados, foi de, aproximadamente, 30 minutos.

Tabela 8-Valores do desgaste das pastilhas do ensaio preliminar.

	Valor do Desgaste
Pastilha 1	0,275 [mm]
Pastilha 2	0,625 [mm]
Pastilha 3	0,275 [mm]
Pastilha 4	0,275 [mm]

3.2. Matriz ortogonal L18 pelo Método de Taguchi

Os principais objetivos a alcançar num processo de maquinagem industrial são o de obter a menor rugosidade superficial possível, a máxima vida útil das ferramentas de corte e uma elevada taxa de produtividade. A rugosidade da superfície é uma das características mais importantes num processo de maquinagem e o desgaste das ferramentas de corte está relacionado diretamente com essa rugosidade. Para isso, é necessário escolher parâmetros que consigam uma menor rugosidade e uma vida longa das ferramentas de corte.

A velocidade de corte (V_c), avanço (f_z) e a penetração axial (a_p) são os parâmetros mais comuns nos processos de maquinagem. Por essa razão, os fabricantes anunciam os valores máximos desses parâmetros em que as suas ferramentas podem trabalhar. Como neste estudo existem dois tipos de ferramentas de diferentes fabricantes, existiu a necessidade de decidir os valores dos parâmetros de maneira a que o campo de aplicação fosse comum às duas. As empresas que forneceram as pastilhas para este estudo são a *Palbit®* e a *Seco®*, ambas são revestidas por carbonetos sinterizados utilizando o processo PVD (*Physical Vapor Deposition*).

Tabela 9- Valores fornecidos pela Palbit® e Seco®.

Valores limites fornecidos pelos fabricantes		
Palbit®	V _c	200-300 [m/min]
	f _z	0,1-0,3[mm/t]
	a _p	0,1-0,3 [mm]
Seco®	V _c	95 [m/min]
	f _z	0,17 [mm/t]
	a _p	0,44 [mm]

Com os valores da Tabela 9, e sabendo a dureza do material a maquinar, foram escolhidos os parâmetros para este estudo. Esses parâmetros são divididos em três níveis (Tabela 10), sendo os valores iguais para as diferentes marcas de pastilhas. O tipo de pastilhas define a primeira coluna da matriz ortogonal de Taguchi e é definido, simbolicamente, pela letra A.

Tabela 10-Valores dos parâmetros, escolhidos para os diferentes níveis.

Parâmetros	Símbolo	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Pastilha	A	1	2	-
Velocidade de corte [m/min]	B	50	100	150
Avanço [mm/tooth]	C	0,1	0,2	0,3
Penetração axial [mm]	D	0,1	0,2	0,3

Nesta fase do trabalho, conhecendo os parâmetros e sabendo os valores para os diferentes níveis, é possível definir qual o arranjo ortogonal adequado. Neste caso, como são 4 parâmetros, onde um dos parâmetros tem dois níveis e os outros têm três níveis, o arranjo ortogonal de Taguchi mais adequado é definido pela matriz L18. Isto significa que são necessárias 18 combinações de parâmetros, como é possível ver na Tabela 11.

Após a matriz de Taguchi estar definida os três níveis foram substituídos pelos valores escolhidos, originando a Tabela 12. As pastilhas da *Palbit®* e da *Seco®* foram nomeadas, respectivamente, 1 e 2.

Tabela 11- Matriz L18 de Taguchi.

Número de ensaio	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

Tabela 12-Matriz L18 de Taguchi com os valores no formato dos fabricantes.

Número de ensaio	Pastilha	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/t]	Penetração axial [mm]
1	1	50	0,1	0,1
2	1	50	0,2	0,2
3	1	50	0,3	0,3
4	1	100	0,1	0,1
5	1	100	0,2	0,2
6	1	100	0,3	0,3
7	1	150	0,1	0,2
8	1	150	0,2	0,3
9	1	150	0,3	0,1
10	2	50	0,1	0,3
11	2	50	0,2	0,1
12	2	50	0,3	0,2
13	2	100	0,1	0,2
14	2	100	0,2	0,3
15	2	100	0,3	0,1

16	2	150	0,1	0,3
17	2	150	0,2	0,1
18	2	150	0,3	0,2

Com estes valores e com a ajuda das equações 1 e 2 é possível converter as unidades para o Sistema Internacional, ficando a matriz definida de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13-Matriz L18 de Taguchi no formato do Sistema Internacional.

Número de ensaio	Pastilha	Velocidade de rotação [rpm]	Velocidade de avanço [mm/min]	Penetração axial [mm]
1	1	636,62	254,65	0,1
2	1	636,62	509,30	0,2
3	1	636,62	763,94	0,3
4	1	1273,24	509,30	0,1
5	1	1273,24	1018,59	0,2
6	1	1273,24	1527,89	0,3
7	1	1909,86	763,94	0,2
8	1	1909,86	1527,89	0,3
9	1	1909,86	2291,83	0,1
10	2	636,62	254,65	0,3
11	2	636,62	509,30	0,1
12	2	636,62	763,94	0,2
13	2	1273,24	509,30	0,2
14	2	1273,24	1018,59	0,3
15	2	1273,24	1527,89	0,1
16	2	1909,86	763,94	0,3
17	2	1909,86	1527,89	0,1
18	2	1909,86	2291,83	0,2

Após a definição da matriz ortogonal L18, foram realizados 18 ensaios experimentais, correspondentes às combinações definidas pela matriz ortogonal de Taguchi e, verificou-se, qual delas é o que origina a menor rugosidade superficial e que proporciona uma maior vida útil das ferramentas de corte.

3.3. Materiais e ferramentas

Com o objetivo de estudar o desgaste das ferramentas de corte foi escolhido um material bastante duro para os ensaios. Estes ensaios foram realizados pelo processo de fresagem, num bloco de ferro fundido branco com alto crómio (F17A31 27CR), como se pode observar na Figura 21. Esse bloco possui uma dureza de 370 HB e as suas dimensões iniciais foram de 65 [mm] de altura, 180 [mm] de comprimento e 65 [mm] de largura.



Figura 21- Bloco de ferro fundido branco na mesa da CNC.

Devido à geometria do bloco foi necessário maquinar as faces (operação de facejamento) que ficam em contacto com os mordentes da prensa de apertos para melhorar a sua fixação. Assim, tal como se pode observar na Figura 21, as faces de contacto do bloco ficam paralelas aos mordentes e, desta forma, a área de contacta aumenta e melhora a fixação do bloco na prensa. Para além dessas faces de contacto foi necessário facejar a superfície onde se iriam realizar os ensaios experimentais de maquinagem, garantindo, assim, que essa superfície ficaria uniforme e horizontal.



Figura 22-Realização dos apoios na fresadora de topo.

Depois do bloco estar preparado e fixo na mesa da *CNC*, procedeu-se à realização dos ensaios experimentais de acordo com os parâmetros definidos na matriz ortogonal de ensaios, L18. Para implementar essas operações de maquinagens foi necessário, previamente, gerar o código *CNC* com os respetivos parâmetros para cada ensaio. Esse código é gerado num *software* de *CAM* (*Computer Aided Manufacturing*) designado por *MasterCam*®, onde foi, antecipadamente, efetuada a simulação de maquinagem. Depois da obtenção do código *CNC*, ele enviado para a máquina de comando numérico via cabo *RS 232*.

Durante cada ensaio experimental foi necessário para-lo periodicamente, para registar a rugosidade superficial e a progressão do desgaste das pastilhas. Para estudar o desgaste das pastilhas contabilizou-se o tempo que estas se encontram em contacto com o bloco a maquinar.

A rugosidade foi medida em duas regiões diferentes do bloco, onde uma encontra-se no centro e outra mais próxima da borda lateral do bloco, como é visível na Figura 23. Para cada região foram efetuadas três medições. Estas medições foram realizadas utilizando um rugosímetro da marca Mitutoyo e modelo RJ130. O comprimento de amostragem (*cut-off*) foi de 0,8 [mm] e a uma velocidade de 0,5 [mm/s]

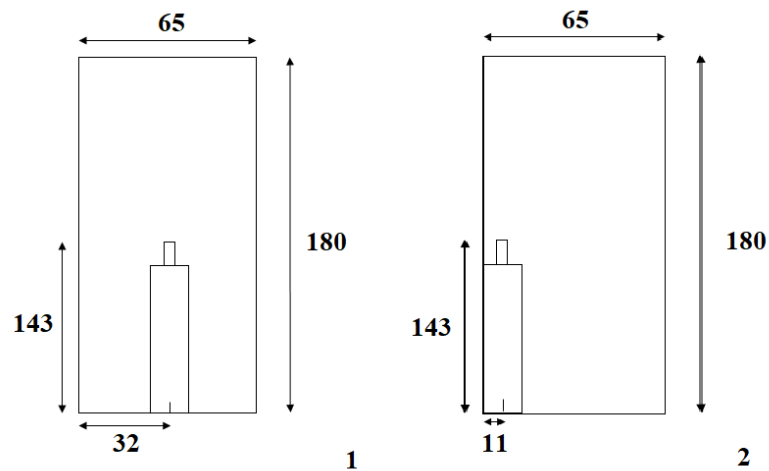


Figura 23-As duas medições de rugosidade superficial (unidades em mm).

O tempo de maquinagem foi registado com um cronómetro, esse tempo foi medido durante a passagem na face do bloco. O tempo de vida útil da ferramenta é calculado multiplicando o número de vezes que a fresa passa na face que está a ser maquinada. O tempo que a fresa passava na face do bloco foi registado duas vezes.

Os dezoito ensaios foram realizados na fresadora de comando numérico, Deckel Maho DMC 63V (dados técnicos encontram-se no anexo A) representada na Figura 24. As operações de fresagem foram realizadas utilizando uma trajetória linear da esquerda para a direita.



Figura 24-Fresadora universal usada neste projeto. Modelo:Deckel Maho DMC 63V

Relativamente às pastilhas, estas possuem um papel muito importante na maquinagem, por isso devem ser bem colocadas e fixadas à ferramenta de corte. Os dois tipos de pastilhas utilizadas para as fresas foram:

- WNHU 04T310, fabricadas pela *Palbit*®, empresa Portuguesa localizada em Albergaria-a-Velha.

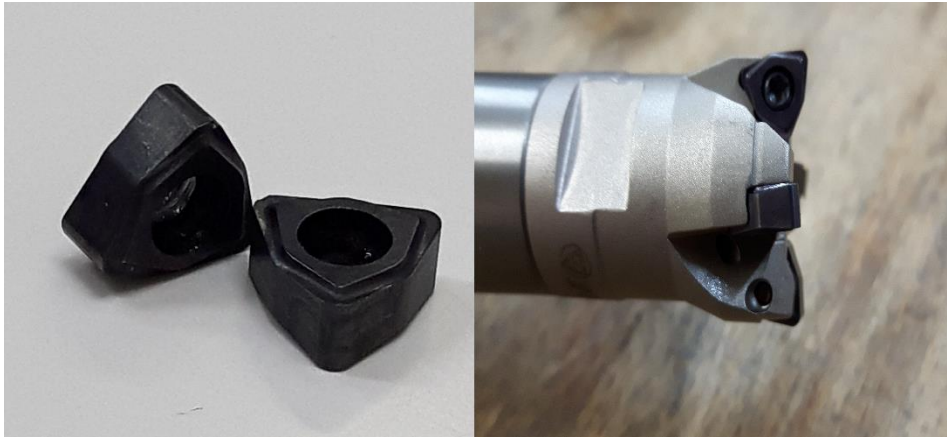


Figura 25- Pastilhas fornecidas pela Palbit e a sua devida colocação na ferramenta.

- LPHW060310 D06 MH1000, fabricadas pela *Seco*®, empresa Sueca com sede em Fagersta e em Portugal encontra-se representada em Santa Maria da Feira.



Figura 26- Pastilhas fornecidas pela Seco e a sua devida colocação na ferramenta.

Como cada ferramenta leva quatro pastilhas, para ambas as marcas, foi necessário diferencia-las para que fosse possível saber qual a pastilhas e qual o seu posicionamento na ferramenta. Essa distinção foi feita numericamente e com a ajuda de quatro cores, azul, vermelho, verde e preto.

4. Resultados Obtidos

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios relativamente à vida útil das pastilhas, à rugosidade média e à taxa de produção (taxa de material removido).

Para obter a vida útil das pastilhas foi preciso escolher o valor limite para o desgaste das mesmas. Esse valor foi obtido com a ajuda da norma ISO 8688-1 e corresponde a 0,2 [mm] de desgaste de flanco (VB). Para que isso seja mais claro são apresentadas figuras do ensaio 3 como exemplo. Na Figura 27 são apresentadas as vistas de topo e lateral de uma das pastilhas do ensaio 3, após a primeira paragem.

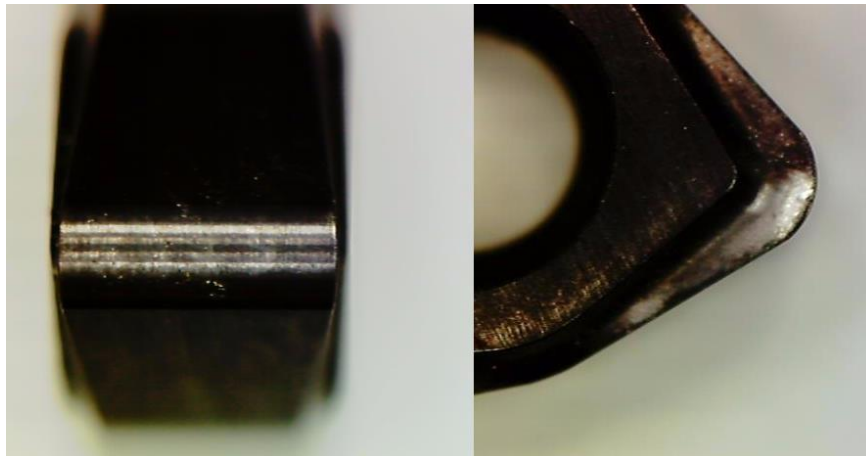


Figura 27- Pastilha do ensaio 3 com apenas uma paragem.

Na figura 28 é apresentada a pastilha após a terceira paragem, onde ultrapassou o valor limite de desgaste. Dessa figura, pode observar-se na vista 1 o valor é de 0,386 [mm] e na vista 2 é de 0,278 [mm].

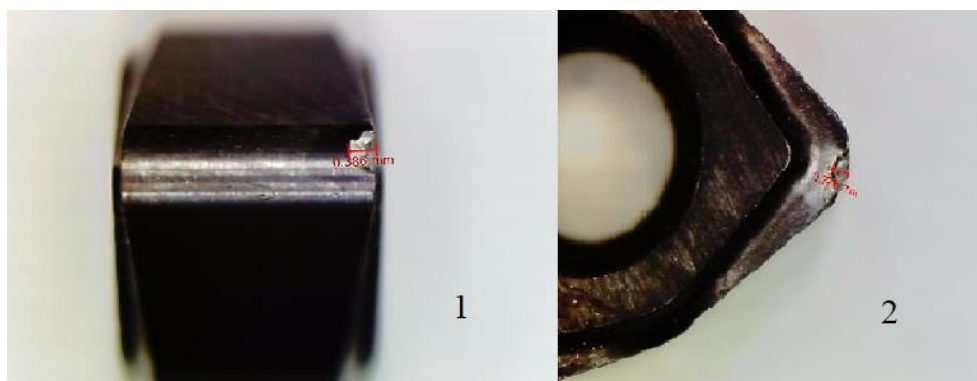


Figura 28-Pastilha do ensaio 3 após a terceira paragem.

Na Tabela 14 são apresentados os tempos de vida das pastilhas, expressos em minutos. Para diminuir o erro, os tempos foram medidos duas vezes para que se pudesse posteriormente fazer uma média.

Tabela 14- Valores da vida útil obtidos nos ensaios.

Número de ensaio	Vida útil das pastilhas [min]
1	163
2	8
3	5
4	64
5	3
6	2
7	7
8	2
9	1
10	222
11	55
12	15
13	48
14	55
15	75
16	135
17	5
18	1

A média da vida útil das ferramentas de corte dos dezoito ensaios é de 48 minutos, sendo o ensaio 10 o que tem um valor de vida útil mais alto (222 minutos), e os ensaios 9 e 18 (1 minuto) os que têm o valor mais baixo.

No que diz respeito aos valores da rugosidade média (R_a), os valores em cada posição foram medidos três vezes por cada paragem da fresadora *CNC*, que proporcionou obter uma média como é possível verificar na Tabela 15.

Com base na Tabela 15, o ensaio que contém o valor mais elevado de rugosidade é o ensaio 2 ($3,08 \mu\text{m}$) enquanto o ensaio 16 originou o menor valor rugosidade superficial ($0,31 \mu\text{m}$).

Outro fator importante para avaliação, como já foi mencionado anteriormente, é a taxa de produção (taxa de material removido). Esta taxa consiste na quantidade de material que se consegue maquinar num período de tempo.

Tabela 15-Valores obtidos nos ensaios para a rugosidade superficial.

Número de ensaio	Média da Posição 1 [μm]	Média da Posição 2 [μm]	Média da rugosidade [μm]
1	2,19	2,11	2,15
2	3,64	2,51	3,08
3	1,77	2,74	2,26
4	1,93	1,96	1,95
5	1,87	1,83	1,85
6	2,15	2,29	2,22
7	2,59	1,89	2,24
8	1,55	1,97	1,76
9	1,72	2,21	1,97
10	0,6	0,53	0,57
11	0,69	0,48	0,59
12	0,86	0,67	0,77
13	0,42	0,57	0,50
14	0,48	0,72	0,60
15	0,71	0,88	0,80
16	0,31	0,31	0,31
17	0,45	0,42	0,44
18	0,46	0,45	0,46

Na Tabela 16 são representados os valores da taxa de produção, estes foram obtidos recorrendo à expressão 3 que se encontra representada no capítulo 2. O parâmetro a_e representa a penetração radial, que neste estudo é 10 [mm].

Da Tabela seguinte (Tabela 16), pode também afirmar-se que os ensaios 6, 8 e 18 tiveram a maior taxa de produção, com um valor de 4,584 [cm^3/min]. Em contrapartida, o valor mais baixo ocorreu para o ensaio 1 com uma taxa de produção de 0,255 [cm^3/min], seguido pelos ensaios 4 e 11, com um valor de apenas 0,509 [cm^3/min].

Tabela 16-Valores obtidos nos ensaios para a taxa de produção.

Número de ensaio	Velocidade de avanço [mm/min]- V_f	Penetração axial [mm]- a_p	a_e [mm]	T_p [cm ³ /min]
1	254,65	0,1	10	0,255
2	509,30	0,2		1,019
3	763,94	0,3		2,292
4	509,30	0,1		0,509
5	1018,59	0,2		2,037
6	1527,89	0,3		4,584
7	763,94	0,2		1,528
8	1527,89	0,3		4,584
9	2291,83	0,1		2,292
10	254,65	0,3		0,764
11	509,30	0,1		0,509
12	763,94	0,2		1,528
13	509,30	0,2		1,019
14	1018,59	0,3		3,056
15	1527,89	0,1		1,528
16	763,94	0,3		2,292
17	1527,89	0,1		1,528
18	2291,83	0,2		4,584

5. Análise e Discussão dos Resultados

5.1.Método de Taguchi

5.1.1. Razão Sinal-Ruído

Nos processos de fabrico por arranque de apara, idealmente, o objetivo será conseguir uma rugosidade superficial baixa, uma vida útil das ferramentas de corte longa com uma elevada taxa de produção. Como referido anteriormente, a razão sinal-ruído mede a sensibilidade da característica de qualidade estudada (rugosidade, vida útil da ferramenta e taxa de produção) de uma maneira controlada relativamente aos fatores não controláveis (fatores de ruído). Para isso, do ponto de vista da qualidade, existem três categorias típicas de características de qualidade, dependendo do objetivo pretendido e que são “nominal é o melhor”, “maior é o melhor” e “menor é o melhor”. Assim, de acordo os nossos objetivos, pretende-se minimizar a rugosidade, maximizar a vida útil da ferramenta e a taxa de produção. Nesse sentido, tem-se:

- Vida útil das ferramentas de corte

Com ajuda da Tabela 14, onde estão representados os valores da vida útil das ferramentas de corte, e recorrendo à expressão 6 (“maior é o melhor”) é possível calcular a razão sinal-ruído para este fator, onde n representa o número de valores a ser lidos e y_i representa o valor do tempo de vida das ferramentas, medido o ensaio experimental.

$$S/N_L = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Equação 6}$$

Para uma melhor compreensão, é apresentado um exemplo do cálculo para o primeiro ensaio.

$$S/N_L = -10 \times \log \left(\frac{1}{1} \times \frac{1}{163^2} \right) = 44,244 [dB]$$

Na Tabela 17 são apresentados os valores da razão sinal-ruído obtidos dos dezoito ensaios. É de salientar que o valor máximo corresponde ao ensaio 16 e o mínimo ao ensaio 2.

Tabela 17- Valores da razão S/N para a vida útil das ferramentas de corte.

Número de ensaio	Vida útil das pastilhas [min]	S/N _L [dB]
1	163	44,244
2	8	18,062
3	5	13,979
4	64	36,124
5	3	9,542
6	2	6,021
7	7	16,902
8	2	6,021
9	1	0,000
10	222	46,927
11	55	34,807
12	15	23,522
13	48	33,625
14	55	34,807
15	75	37,501
16	135	42,607
17	5	13,979
18	1	0,000

Na Figura 29 são apresentados os valores da razão S/N's para os diferentes parâmetros de maquinagem. Para simplificar a mesma, foram criadas abreviaturas como é possível observar na Tabela 18.

Tabela 18- Abreviaturas para os vários níveis dos parâmetros.

Designação	
A1	Pastilhas da <i>Palbit</i>
A2	Pastilhas da <i>Seco</i>
B1	$V_c=50$ [m/min]
B2	$V_c=100$ [m/min]
B3	$V_c=150$ [m/min]
C1	$f_z=50$ [mm/t]
C2	$f_z=100$ [mm/t]
C3	$f_z=150$ [mm/t]
D1	$a_p=50$ [mm]
D2	$a_p=100$ [mm]
D4	$a_p=150$ [mm]

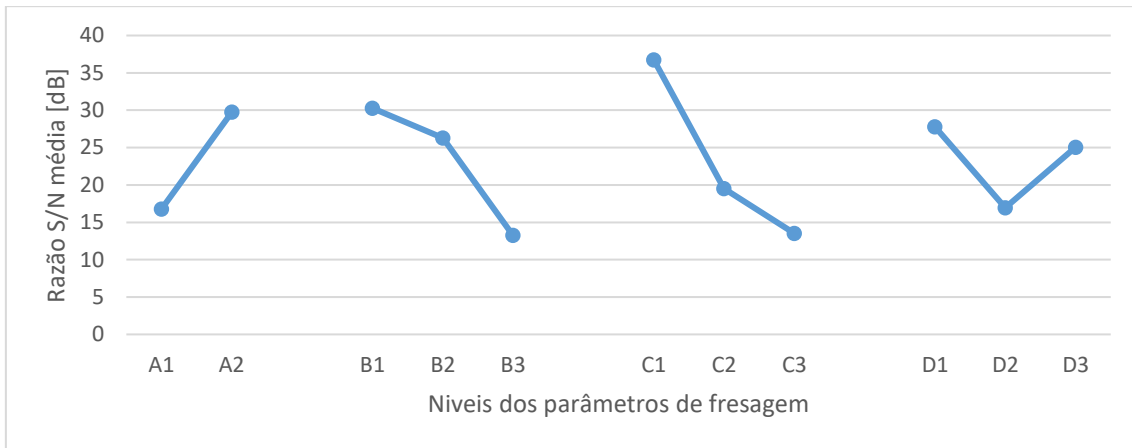


Figura 29- Valor médio S/N para os diferentes níveis na vida útil das ferramentas.

Observando a Figura 29, é possível chegar à conclusão de qual é a melhor combinação para a vida útil das ferramentas. Essa combinação é A2B1C1D1, ou seja, Pastilhas 2 (Seco®), $V_c=50$ [m/min], $f_z=0,1$ [mm/dente] e $a_p=0,1$ [mm].

- Rugosidade Superficial

Um dos objetivos da maquinagem é conseguir uma rugosidade superficial o mais reduzida possível, por isso, a razão S/N para este parâmetro é “quanto menor melhor”. Com a ajuda da Tabela 15 e da equação 7 foi possível chegar aos valores apresentados na Tabela 19.

$$S/N_s = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

Equação 7

Tabela 19-Valores da razão S/N para a rugosidade superficial.

Número de ensaio	S/Ns [dB]
1	-6,837
2	-9,903
3	-7,609
4	-6,030
5	-5,352
6	-6,938
7	-6,868
8	-4,965
9	-5,920
10	4,801
11	5,886
12	1,897
13	5,588
14	3,990
15	1,804
16	9,458
17	6,536
18	6,808

Na Figura 30 são apresentados os valores médios da razão S/N da rugosidade superficial. As abreviaturas são as mesmas da tabela 18.

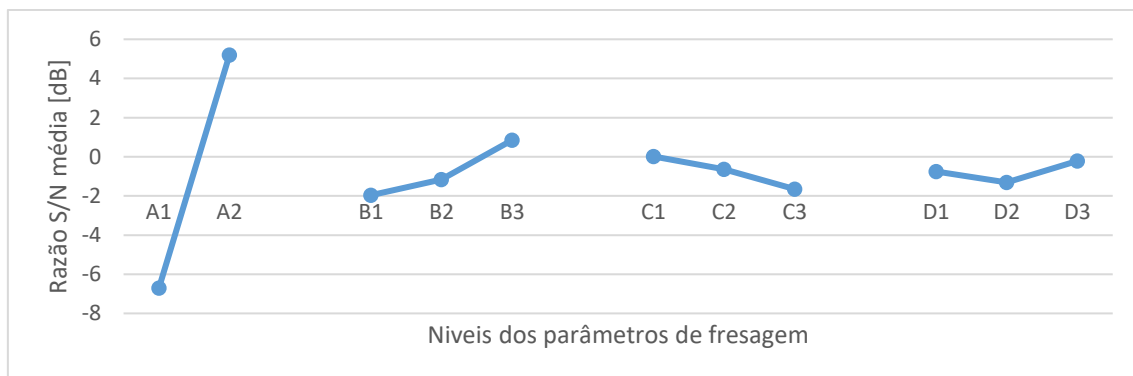


Figura 30-Valor médio S/N para os diferentes níveis na rugosidade superficial.

Para a rugosidade superficial a melhor combinação é A2B3C1D3, ou seja, Pastilha 2 (Palbit®), $V_c=150$ [mm/min], $f_z=0,1$ [mm/dente] e $a_p=0,1$ [mm].

- Taxa de produção

Outro parâmetro bastante importante para a indústria é a taxa de produção, e por isso, a categoria da razão Sinal-Ruído deverá ser a “quanto maior melhor”. Com os valores da tabela 16 e com a equação 6 é possível chegar aos valores da razão S/N para a taxa de produção, como é possível verificar na tabela 20.

$$S/N_L = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Equação 6}$$

Tabela 20- Valores da razão S/N da taxa de produção.

Número de ensaio	Tp [cm ³ /min]	S/N _L [dB]
1	0,255	-11,881
2	1,019	0,160
3	2,292	7,204
4	0,509	-5,861
5	2,037	6,181
6	4,584	13,224
7	1,528	3,682
8	4,584	13,224
9	2,292	7,204
10	0,764	-2,339
11	0,509	-5,861
12	1,528	3,682
13	1,019	0,160
14	3,056	9,702
15	1,528	3,682
16	2,292	7,204
17	1,528	3,682
18	4,584	13,224

Relativamente à taxa de produção, a Figura 31 representa os valores médios da razão S/N da taxa de produção. As abreviaturas são as mesmas da tabela 18.

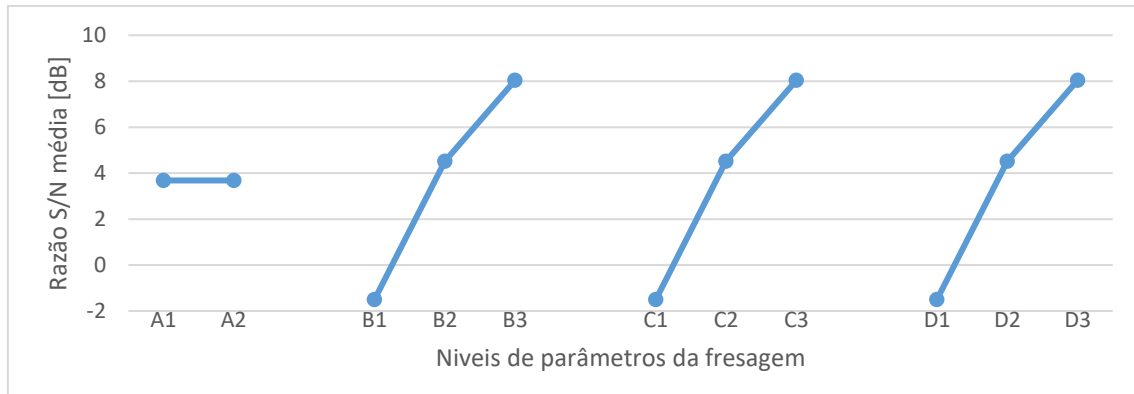


Figura 31- Valor médio S/N para os diferentes níveis na taxa de produção.

Perante a Figura 31, verifica-se que a melhor combinação tem duas vertentes, ou seja, poderá ser A1B3C3D3 ou A2B3C3D3. Sabendo que A1 e A2 representam, respetivamente, as Pastilhas 1 e 2, B3 representa a $V_c=150$ [m/min], C3 a $f_z= 0,1$ [mm/dente] e por fim, D3 representa $a_p= 0,3$ [mm].

5.1.2. Análise ANOVA

O objetivo da análise de variância é determinar quais os parâmetros analisados neste projeto é que afetam mais significativamente a vida útil das pastilhas, a rugosidade superficial e a taxa de produção [13].

Nas tabelas seguintes, Df representa os graus de liberdade, SS a soma dos quadrados, MS a média dos quadrados e o Valor F é uma ferramenta estatística para verificar quais são os parâmetros com maior influência na característica da qualidade. O MS é obtido pela divisão do SS por Df.

- Vida Útil das ferramentas

Tabela 21- Valores da ANOVA para a vida útil das ferramentas.

Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Pastilha	1	759	758,96	19,56	0,001	17,98%
Vc	2	949,1	474,56	12,13	0,002	22,48%
fz	2	1744,2	872,11	22,48	0	41,32%
ap	2	381,3	190,65	4,91	0,033	9,03%
Erro	10	387,9	38,79			9,19%
Total	17	4221,5				100,00%

Como é possível verificar através da Tabela 21, o parâmetro que mais influencia a vida útil das pastilhas é o avanço com 41,32%, em segundo lugar é a velocidade de corte com 22,48%.

- Rugosidade Superficial

Tabela 22- Valores da ANOVA para a rugosidade superficial.

Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Pastilha	1	638,313	638,313	235,59	0	90,85%
Vc	2	24,983	12,492	4,61	0,038	3,56%
fz	2	8,587	4,294	1,58	0,252	1,22%
ap	2	3,595	1,797	0,66	0,536	0,51%
Erro	10	27,094	2,709			3,86%
Total	17	702,573				100,00%

A Tabela 22 mostra que para a rugosidade superficial, o tipo de pastilha é o parâmetro que mais influência tem, com um peso bastante acentuado (98,85%), quando comparado com os outros parâmetros.

- Taxa de Produção

Tabela 23- Valores da ANOVA para a taxa de produção.

Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Pastilha	1	0	0	-	-	0,00%
Vc	2	279,418	139,709	-	-	33,33%
fz	2	279,418	139,709	-	-	33,33%
ap	2	279,418	139,709	-	-	33,33%
Erro	10	0	0			0,00%
Total	17	838,253				100,00%

No caso da taxa de produção, a Tabela 23 mostra que a velocidade de corte, avanço e penetração axial têm o mesmo impacto neste fator e que é de, aproximadamente, 33,3%.

5.2. Análise Relacional de Grey

Para realizar a Análise Relacional de Grey é necessário recorrer aos valores da razão S/N obtidos através do método de Taguchi, como é possível verificar na Tabela 24.

Tabela 24- Valores da razão Sinal-Ruido.

	S/N Vida Útil [dB]	S/N Rugosidade [dB]	S/N Taxa de Produção [dB]
1	44,2438	-6,8374	-11,8812
2	18,0618	-9,9029	0,1600
3	13,9794	-7,6087	7,2037
4	36,1236	-6,0303	-5,8606
5	9,5424	-5,3519	6,1806
6	6,0206	-6,9383	13,2243
7	16,9020	-6,8684	3,6818
8	6,0206	-4,9647	13,2243
9	0,0000	-5,9198	7,2037
10	46,9271	4,8008	-2,3388
11	34,8073	5,8856	-5,8606
12	23,5218	1,8973	3,6818
13	33,6248	5,5880	0,1600
14	34,8073	3,9903	9,7024
15	37,5012	1,8037	3,6818
16	42,6067	9,4583	7,2037
17	13,9794	6,5357	3,6818
18	0,0000	6,8076	13,2243

De seguida é necessário normalizar os valores da razão sinal-ruído da Tabela 24, para isso recorre-se à equação 8 obtendo assim a Tabela 25.

$$x_{ij} = \frac{\eta_{ij} - \min_{ij}}{\max_{ij}\eta_{ij} - \min_{ij}\eta_{ij}} \tag{Equação 8}$$

Depois da Tabela 25, já é possível calcular o coeficiente relacional de Grey com a utilização da equação 9. Nesta mesma equação a característica ζ varia de 0 a 1, sendo que para este projeto o valor utilizado para os três casos (vida útil, rugosidade e taxa de produção) foi de 0,5, isto é, considerou-se o mesmo peso para os três fatores de controlo.

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}{|x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|} \tag{Equação 9}$$

Tabela 25- Valores da razão S/N normalizados para a análise relacional de Grey.

	S/N Vida Útil	S/N Rugosidade	S/N Taxa de Produção
1	0,9428	0,1583	0,0000
2	0,3849	0,0000	0,4796
3	0,2979	0,1185	0,7602
4	0,7698	0,2000	0,2398
5	0,2033	0,2351	0,7194
6	0,1283	0,1531	1,0000
7	0,3602	0,1567	0,6199
8	0,1283	0,2551	1,0000
9	0,0000	0,2057	0,7602
10	1,0000	0,7594	0,3801
11	0,7417	0,8155	0,2398
12	0,5012	0,6095	0,6199
13	0,7165	0,8001	0,4796
14	0,7417	0,7176	0,8597
15	0,7991	0,6046	0,6199
16	0,9079	1,0000	0,7602
17	0,2979	0,8490	0,6199
18	0,0000	0,8631	1,0000

Tabela 26-Coeficiente relacional de Grey.

Ensaio	S/N Vida Útil	S/N Rugosidade	S/N Taxa de Produção
1	0,8974	0,3727	0,3333
2	0,4484	0,3333	0,4900
3	0,4159	0,3619	0,6758
4	0,6847	0,3846	0,3968
5	0,3856	0,3953	0,6406
6	0,3645	0,3712	1,0000
7	0,4387	0,3722	0,5681
8	0,3645	0,4016	1,0000
9	0,3333	0,3863	0,6758
10	1,0000	0,6752	0,4465
11	0,6594	0,7304	0,3968
12	0,5006	0,5615	0,5681
13	0,6382	0,7144	0,4900
14	0,6594	0,6390	0,7809
15	0,7134	0,5584	0,5681
16	0,8445	1,0000	0,6758
17	0,4159	0,7681	0,5681
18	0,3333	0,7850	1,0000

Por fim, com a Tabela 26 e com a equação 10 é possível chegar ao grau relacional de Grey, como é possível verificar na Tabela 27.

$$\gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \omega_i \xi_{ij}(i) \quad \text{Equação 10}$$

Tabela 27- Grau relacional de Grey e a devida ordem.

Ensaio	Grau Relacional de Grey	Ordem
1	0,53446	12
2	0,42391	18
3	0,48457	14
4	0,48870	13
5	0,47382	15
6	0,57858	10
7	0,45967	17
8	0,58871	8
9	0,46517	16
10	0,70721	2
11	0,59553	7
12	0,54340	11
13	0,61420	5
14	0,69312	4
15	0,61332	6
16	0,84012	1
17	0,58405	9
18	0,70612	3

Posto isto, é possível chegar à tabela 28 que contém a média do grau relacional de Grey para cada nível. Para além disso, a tabela também contém a média total. Com estes valores é possível chegar à melhor combinação, lembrando que quanto maior for o valor do grau relacional de Grey melhor.

Tabela 28- Tabela de resposta para o grau relacional de Grey.

		Grau relacional de Grey				
Símbolo	Parâmetros	Nível1	Nível2	Nível3	Max-min	Média Total
A	Pastilhas	0,4997	0,6552	-	0,1512	0,5775
B	Vc	0,5482	0,5770	0,6073	0,0591	
C	fz	0,6074	0,5599	0,5652	0,0475	
D	ap	0,5469	0,5369	0,6487	0,1119	

Na tabela 28 é possível verificar que a melhor combinação é A2B3C1D3, onde A2 representa a Pastilha 2, B3 a $V_c = 150$ [m/min], C1 a $f_z=0,1$ [mm/t] e D3 é a penetração axial de 0,3 [mm].

5.2.1. Análise ANOVA

É necessário efetuar a análise de variância para determinar quais são os parâmetros que mais afetam os três fatores a serem estudados. Para isso foram usados os valores dos parâmetros nos diferentes níveis e os valores da tabela 24., sendo assim possível chegar aos resultados da tabela 29.

Tabela 29-Valores da ANOVA para a análise relacional de Grey.

Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Pastilha	1	0,1088	0,1088	42,18	0	54,62%
Vc	2	0,0105	0,0052	2,03	0,182	5,27%
fz	2	0,0081	0,0041	1,58	0,254	4,09%
ap	2	0,0460	0,0230	8,91	0,003	23,08%
Erro	10	0,0258	0,0026			12,95%
Total	17	0,1992				100,00%

5.2.2. Confirmação dos Resultados

Depois de selecionar o nível ideal dos parâmetros, a última etapa é validar esses mesmos valores para verificar a melhoria no processo de fresagem. Para isso é necessário calcular a razão S/N estimada ($\hat{\eta}$) usando o nível ideal dos parâmetros do projeto, com o recurso à equação 11 [50].

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{t=1}^q (\bar{\eta}_t - \eta_m) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

η_m – Média total da razão S/N;

$\bar{\eta}_t$ – Razão S/N média para o nível ótimo;

q – Número dos principais parâmetros que influenciam.

Sendo a melhor combinação A2B3C1D3 e com a utilização da equação 11 já é possível calcular a razão S/N estimada.

$$\hat{\eta} = 0,5775 + (0,6552 - 0,5775) + (0,6073 - 0,5775) + (0,6074 - 0,5775) + (0,6487 - 0,5775) = 0,7861$$

Tabela 30- Comparação entre os valores do processo inicial e o ótimo.

	Fatores de corte ótimos		
	Fatores de corte iniciais	Prognóstico	Experiência
Combinação	A2B3C3D2	A2B3C1D3	A2B3C1D3
Vida Útil [m]	1		135
Rugosidade [μm]	0,46		0,31
Taxa de Produção [cm^3/min]	4,584		2,292
Grau relacional de Grey	0,70612	0,7861	0,84012

A tabela 30 apresenta a comparação entre os parâmetros de fresagem inicial e a combinação de parâmetros ideal. É notável que a utilização da combinação de parâmetros de fresagem ideal aumenta o grau relacional de Grey em, aproximadamente, 19 %.

5.3. Aparas obtidas nos ensaios experimentais

Na operação de corte, a formação de apara é fenômeno comum a todos os processos de maquinagem e torna-se, assim, essencial estudá-lo com detalhe [4]. Vários estudos têm sido feitos para verificar a influência da formação da apara na qualidade de produto final, influenciando assim os parâmetros de maquinagem.

Durante os 18 ensaios desta dissertação, foram recolhidas amostras de aparas para todos os ensaios com o objetivo de verificar a sua geometria, dimensões e coloração, tendo-se verificado que apresentaram diferenças significativas entre os vários ensaios realizados. Contudo, como o estudo das aparas não era um dos objetivos deste trabalho e, dada a morosidade para efetuar uma análise deste tipo, optou-se por apresentar alguns exemplos e sugerir este estudo para trabalhos futuros.

A Figura 32 inclui aparas de dois ensaios diferentes. A imagem 1 corresponde ao ensaio 3 onde os parâmetros foram: Pastilha 1 (Palbit), $V_c = 50$ [m/min], $f_z = 0.3$ [mm/t] e $a_p = 0.3$ [mm]. É possível reparar que as aparas possuem um tom dourado.

Na segunda imagem, as aparas possuem um tom azulado/roxo e foram obtidas do ensaio 16 que contém os seguintes parâmetros: Pastilha 2 (Seco), $V_c = 150$ [m/min], $f_z = 0,1$ [mm/t] e $a_p = 0,3$ [mm].

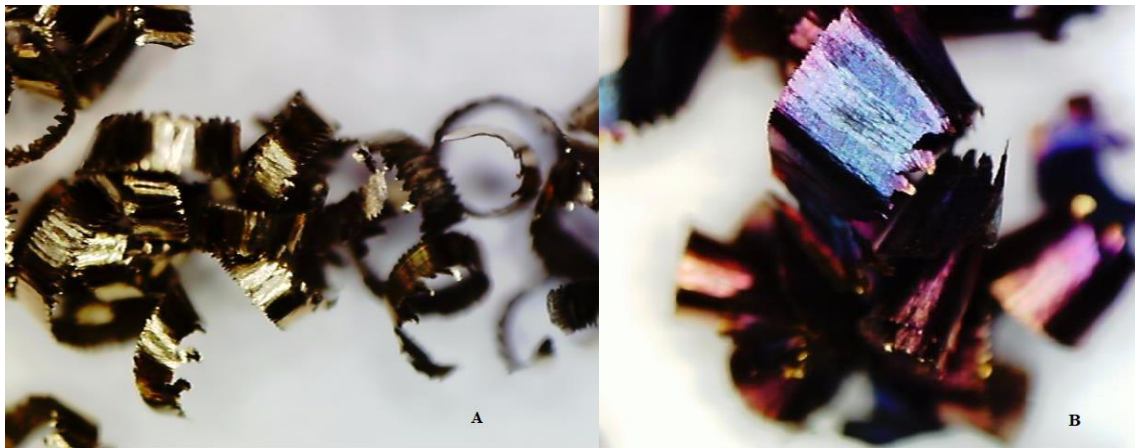


Figura 32-Aparas de dois ensaios experimentais. A-Ensaio 3. B-Ensaio 16.

6. Conclusões e propostas para trabalhos futuros

6.1. Conclusões

O uso do método de Taguchi e a análise relacional de Grey mostraram-se adequados para otimizar os parâmetros no processo de fresagem. Os objetivos pretendidos com estes dois métodos de otimização foram distintos, enquanto que com o método de Taguchi pretendeu-se determinar, individualmente, qual a melhor combinação para a vida útil da ferramenta, para a rugosidade superficial e para a taxa de produção. No caso da análise relacional de Grey o objetivo foi encontrar o ensaio que combine os melhores resultados para o conjunto dos fatores: a vida útil das ferramentas, rugosidade superficial e taxa de produção, definindo um peso semelhante para todos eles.

No método de Taguchi, para cada fator a estudar, foi determinada a melhor combinação de parâmetros de maquinagem, assim, para a vida útil das ferramentas a melhor combinação foi A2B1C1D1, que significa, a pastilha da *Seco*®, velocidade de corte 50 [m/min], avanço de 0,1 [mm/t] e penetração axial de 0,1 [mm]. Para a rugosidade, a melhor combinação foi A2B2C1D3 (pastilha da *Seco*®, velocidade de corte de 100 [m/min], avanço de 0,1 [mm/t], penetração de 0,3 [mm]). Por último, na taxa de produção a melhor combinação tem duas vertentes pois a escolha das pastilhas não influencia o resultado final, por isso as duas combinações seriam A1B3C3D3 e A2B3C3D3, assim, a velocidade de corte de 150 [m/min], avanço de 0,3 [mm/t] e penetração de 0,3 [mm].

Com a utilização da ANOVA é possível calcular quais os parâmetros mais influentes com base nos resultados obtidos dos ensaios experimentais. No caso da vida útil, o avanço é o mais influente, com 41,32 %, seguido da velocidade de corte, com 22,48 %. Na rugosidade superficial, a escolha da pastilha foi o que mais influenciou, com 90,85%. Por fim, na taxa de produção chega-se à conclusão que a escolha das pastilhas não tem qualquer influência e os restantes três parâmetros têm a mesma importância, de 33,33 %.

Para o segundo método, a análise relacional de Grey, foi possível chegar à combinação que suporta o melhor balanço entre a vida útil, rugosidade superficial e taxa de produção. Essa combinação foi A2B3C1D3, ou seja, pastilha da *Seco*®, velocidade de corte 150 [m/min], avanço de 0,1 [mm/t] e penetração axial de 0,3 [mm]. Feita a análise de variância para este método, concluiu-se que o parâmetro que mais influenciou, nos ensaios realizados, foi a escolha do tipo de pastilha com 54,62 % seguido da penetração axial com 23,08 %.

Comparando os dois métodos, o método de Taguchi é uma ferramenta muito poderosa para este estudo, contudo, está muito direcionado para a otimização de um único fator de controlo. Em contrapartida, a análise relacional de Grey permite otimizar, através de um balanceamento, vários fatores de controlo, neste caso foi a rugosidade superficial, a vida útil da ferramenta e a taxa de produção.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

No ponto 5.3, fez-se uma breve análise da mudança de tonalidade cromática da apara, função da combinação dos diferentes parâmetros. Contudo, seria interessante efetuar uma análise mais extensiva e exaustiva, onde fosse, também, acrescentada a geometria e dimensão das aparas para os 18 ensaios. Assim, com base nas amostras de aparas retiradas durante os ensaios, seria possível efetuar um estudo que permitisse relacionar os parâmetros de maquinagem com o tipo de apara, bem como, relaciona-lo com os outros fatores de controlo, nomeadamente, a rugosidade superficial, a vida útil da ferramenta e a taxa de produção.

Um aspeto importante a analisar futuramente seria a interação entre os diferentes parâmetros de maquinagem, para isso, seria necessário utilizar outra matriz ortogonal de ensaios experimentais. Uma sugestão, considerando os níveis utilizados neste trabalho, seria a utilização de uma matriz de Taguchi L27.

Outra vertente bastante interessante para trabalhos futuros era estudar a temperatura das pastilhas para diferentes combinações de parâmetros de maquinagem, para isso, poderia recorrer-se à utilização de uma câmara termográfica.

Referências

-
- [1] T. Matéria, “Revolução Industrial,” *História*, 2017. [Online]. Available: <https://www.todamateria.com.br/revolucao-industrial/>. [Accessed: 04-Jan-2017].
- [2] TecMecanico, “Fresadoras,” *TecMecanico*. [Online]. Available: <http://tecmechanico.blogspot.pt/2011/10/fresadoras.html>. [Accessed: 04-Jan-2017].
- [3] E. P. MICHELS, I. C. BORGSMANN, M. VALLERIUS, M. W. BUSANELLO, and V. J. ALVES, “Determinação da Curva de Vida de Ferramentas em Usinagem,” *Sem. Int. Das Eng. Da Fabor.*, 2011.
- [4] J. P. Davim, *Princípios da Maquinagem*, 2ª Edição. Publindústria, Edições Técnicas, 2008.
- [5] Certec, “Alumina – Óxido de alumínio – Al₂O₃,” *Ceramica Certec*. [Online]. Available: <http://www.ceramicacertec.com.br/index.php/produtos/alumina/>. [Accessed: 10-Jan-2017].
- [6] S. Coromant, “Metal duro revestido,” *Coromant, Sandvik*. [Online]. Available: https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx. [Accessed: 13-Feb-2017].
- [7] P. Maurya, P. Sharma, and B. Diwaker, “Implementation of Taguchi methodology to Optimization of CNC end milling process parameters of AL6351 – T6,” vol. 2, pp. 3530–3533, 2012.
- [8] M. Tolouei-Rad and I. . Bidhendi, “On the optimization of machining parameters for milling operations,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 37, no. 1, pp. 1–16, 1997.
- [9] P. G. Benardos and G. C. Vosniakos, “Predicting surface roughness in machining: A review,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 833–844, 2003.
- [10] P. V. S. Suresh, P. V. Rao, and S. G. Deshmukh, “A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model,” vol. 42, no. January, pp. 675–680, 2002.
- [11] A. Aggarwal and H. Singh, “Optimization of machining techniques — A retrospective and literature review,” *Sadhana*, vol. 30, no. 6, pp. 699–711, 2005.
- [12] S. Ramesh, L. Karunamoorthy, and K. Palanikumar, “Fuzzy Modeling and Analysis of Machining Parameters in Machining Titanium Alloy,” *Mater. Manuf.*

- Process.*, vol. 23, no. 4, pp. 439–447, 2008.
- [13] W. H. Yang and Y. S. Tarn, “Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 84, no. 1–3, pp. 122–129, 1998.
- [14] J. Z. Zhang, J. C. Chen, and E. D. Kirby, “Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 184, no. 1–3, pp. 233–239, 2007.
- [15] P. Palanisamy, I. Rajendran, and S. Shanmugasundaram, “Optimization of machining parameters using genetic algorithm and experimental validation for end-milling operations,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 32, no. 7–8, pp. 644–655, 2007.
- [16] P. C. Mishra, D. K. Das, M. Ukamanal, B. C. Routara, and A. K. Sahoo, “Multi-response optimization of process parameters using Taguchi method and grey relational analysis during turning AA 7075/SiC composite in dry and spray cooling environments,” *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 6, pp. 445–456, 2015.
- [17] L. B. Abhang and M. Hameedullah, “Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in turning by using grey relational analysis,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 63, no. 1–4, pp. 13–24, 2012.
- [18] H. Öktem, T. Erzurumlu, and H. Kurtaran, “Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 170, no. 1–2, pp. 11–16, 2005.
- [19] S. Neşeli, S. Yaldiz, and E. Türkeş, “Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 44, no. 3, pp. 580–587, 2011.
- [20] P. J. Ross, *Taguchi techniques for quality engineering*, 2^a Edição. McGraw-Hill, 1996.
- [21] J. Ribeiro, H. Lopes, L. Queijo, and D. Figueiredo, “Optimization of Cutting Parameters to Minimize the Surface Roughness in the End Milling Process Using the Taguchi Method,” *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 61, no. 1, pp. 30–35, 2017.

- [22] H. S. Lu, C. K. Chang, N. C. Hwang, and C. T. Chung, “Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 8, pp. 3808–3817, 2009.
- [23] J. Ribeiro, *Maquinagem*. Bragança: Tecnologia Mecânica II, 2013.
- [24] A. Teixeira da Rocha, *Tecnologia Mecânica Volume III*, 6ª Edição. Coimbra: Coimbra Editora, Limitada, 1994.
- [25] J. P. Davim, A. Festas, and A. Completo, *Tecnologia de Fabrico*. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2009.
- [26] “CNC Establishment,” *CNC Establishment*. [Online]. Available: <http://cncestablishment.com/best-horizontal-milling-machine-review>. [Accessed: 15-Feb-2017].
- [27] C. Machinery, “Speed Vertical Milling Machine,” *Central Machinery*. [Online]. Available: <http://www.harborfreight.com/vertical-milling-machine-40939.html>. [Accessed: 03-Mar-2017].
- [28] W. M. LTDA, “Fresadora 3 eixos/Universal,” *Fresadora Universal T-mill series*. [Online]. Available: <http://www.directindustry.com/pt/prod/kaast-machine-tools-inc/product-67519-1108309.html>. [Accessed: 03-Mar-2017].
- [29] D. MORI, “DMC 1450 V,” *DMG MORI*. [Online]. Available: <http://en.dmgmori.com/products/milling-machines/vertical-machining-centres/dmc-v/dmc-1450-v#Intro>. [Accessed: 03-May-2017].
- [30] S. Coromant, “Fresamento: Fórmulas,” *Sandvik Coromant*. [Online]. Available: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/formulas_and_definitions/formulas/pages/default.aspx. [Accessed: 10-Mar-2017].
- [31] A. R. Meyers and T. J. Slattery, *Basic Machining Reference Handbook*, 2ª Edição. New York, United States: Industrial Press Inc., U.S., 2001.
- [32] S. Coromant, “Fresamento: Considerações Iniciais.” [Online]. Available: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/getting_started/initial_considerations/pages/default.aspx.

- [Accessed: 17-Jun-2017].
- [33] Á. Machado, R. Coelho, A. Abrão, and M. Bacci da Silva, *Teoria da Usinagem dos Materiais*, 1ª Edição. São Paulo, 2009.
- [34] S. Coromant, “Desgaste da ferramenta,” *Sandvik Coromant*. [Online]. Available: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/pages/default.aspx. [Accessed: 20-Mar-2017].
- [35] Sandvik, *Modern Metal Cutting- A PRATICAL HANDBOOK*. Sandvik Coromant, 1994.
- [36] S. Communication and S. Mapping, “International Standard,” *Time*, vol. 2004, 2004.
- [37] M. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, 4nd Editio. John Wiley & Sons, 2010.
- [38] S. Coromant, “Materiais das ferramentas de corte,” *Sandvik Coromant*. [Online]. Available: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/introduction/pages/default.aspx. [Accessed: 14-Apr-2017].
- [39] P. Soares, *Aços*, 6ª Edição. Publindústria, 2010.
- [40] P. Guedes, *Metrologia Industrial*. Lisboa: Lidel, 2011.
- [41] QualityGurus, “Genichi Taguchi,” *QualityGurus*. [Online]. Available: <http://www.qualitygurus.com/gurus/list-of-gurus/genichi-taguchi/>. [Accessed: 09-May-2017].
- [42] W. Y. Fowlkes and C. M. Creveling, *Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Tecnology and Product Development*. Reading, Massachusetts, 1995.
- [43] R. K. Roy, *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- [44] Datalyzer, “Metodologia de Taguchi,” *Datalyzer*, 2010. [Online]. Available: <http://www.datalyzer.com.br/site/suporte/administrador/info/arquivos/info22/22.html>. [Accessed: 24-May-2017].

-
- [45] G. Taguchi, S. Chowdhury, and Y. Wu, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. Canada: John Wiley & Sons, Inc, 2004.
- [46] C.-J. Tzenga, Y.-H. Linb, Y.-K. Yanga, and M.-C. Jengc, "Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis," *J. Sci. Ind. Res. (India)*., vol. 70, no. 7, pp. 2753–2759, 2009.
- [47] C. L. Lin, "Use of the Taguchi Method and Grey Relational Analysis to Optimize Turning Operations with Multiple Performance Characteristics," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 19, no. 2, pp. 209–220, 2004.
- [48] S. K. Nayak, J. K. Patro, S. Dewangan, and S. Gangopadhyay, "Multi-objective Optimization of Machining Parameters During Dry Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Using Grey Relational Analysis," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmipc, pp. 701–708, 2014.
- [49] S. Grades, "STEEL GRADES:TOOL STEEL AND HARD ALLOY:1.2738," *Tool Steel And Hard Alloy*. [Online]. Available: <http://www.steel-grades.com/Steel-Grades/Tool-Steel-Hard-Alloy/1-2738.html>. [Accessed: 13-May-2017].
- [50] Y. F. Hsiao, Y. S. Tarnng, and W. J. Huang, "Optimization of Plasma Arc Welding Parameters by Using the Taguchi Method with the Grey Relational Analysis," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 23, no. 1, pp. 51–58, 2007.

Anexos

Anexo A: Dados técnicos da CNC

Tabela A. 1-Dados técnicos do CNC.

Dados Técnicos	
Fabricante	Deckel Maho
Modelo	DMC 63V
Tipo CNC	Siemens Sinumerik 810D
Peso	4200 kg
Ano	1998
Medidas	L2700 x W1900 x H2400
Especificações	Sistema de Refrigeração
	Sk40
	Digital display
	24 specialized tool change
	380 Volt
	Feeds X Y Z feed automatically
	Stepless gearbox 0-8000 rev/min
	Processing area x630 y500 z500 [mm]
	Table size 800x500 [mm]
	Table load 500 kg

Anexo B: Dados técnicos da ferramenta de fresagem da Palbit®

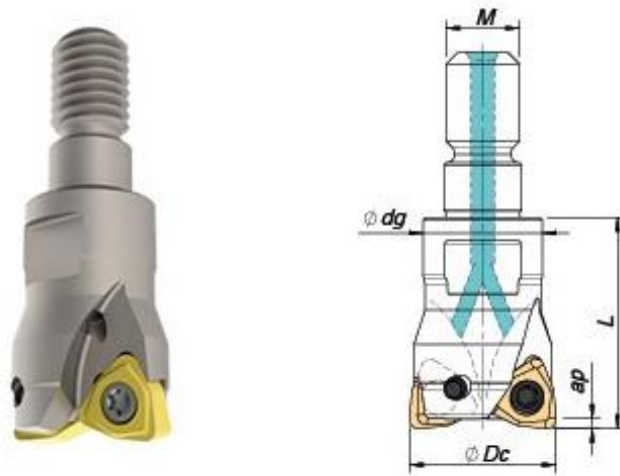


Figura B. 1- Dados técnicos da ferramenta da Palbit.

Tabela B. 1- Características das ferramentas da Palbit.

Milling Tool PLUS 49095	
Order Code	181030500
Reference	025R49095-04-07-M12030
D_c [mm]	25
K_r (°)	95°
M	M12
dg [mm]	21
L [mm]	30
a_p [mm]	0.3
Z efective cutting edge	4
Coupling Type	Threaded Coupling
Axial (°)	-7°
Tool Hand	Right
Weight (Kg)	0.09

Anexo C: Propriedades das pastilhas da Palbit®

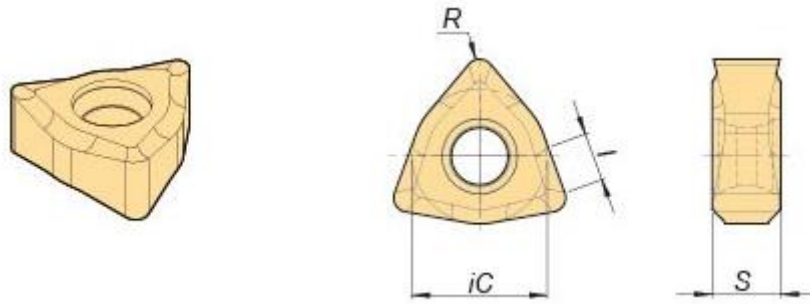
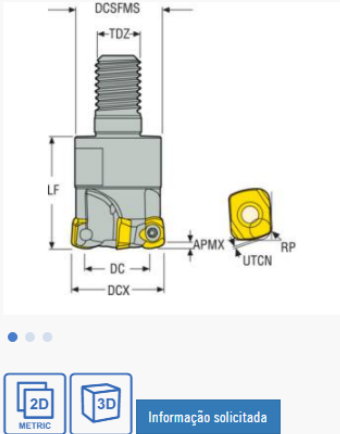


Figura C. 1-Desenho técnico das pastilhas da Palbit®.

IC (mm)	6,35	CUTTING CONDITIONS		
S (mm)	3,97	P	01-05	
I (mm)	2,8	Vc	200-300	m/min
R (mm)	1	Fz	0.10-0.3	mm/t
Z effective cutting edge	6	ap		
Tolerance Class Insert	H	K	01-05	
Coating	PVD	Vc	200-300	m/min
Work hand	L,R	Fz	0.10-0.3	mm/t
		ap		

Figura C. 2-Condições de corte para as pastilhas da Palbit®.

Anexo D: Dados técnicos da ferramenta de fresagem da Seco®



Nome	Descrição	Valor
APMX	Profundidade de corte máxima	0.8 mm
Cmax	Diâmetro máximo da interpolação helicoidal	48.9 mm
Cmin	Diâmetro mínimo da interpolação helicoidal	32.5 mm
DC	Diâmetro de corte	16.5 mm
dcsfms	Diâmetro da superfície de contato lado da máquina	23.0 mm
DCX	Diâmetro de corte máximo	25.0 mm
Designação	Produto - Designação	R217.21-1225.RE-LP06.4A
Designação ANSI	Produto - Designação ANSI	R217.21-1225.RE-LP06.4A
GAMF	âng. de raída radial	-5.0 deg
GAMP	âng. de saída axial	4.0 deg
ItemNo.	Item No.	02789705
LF	Compr. funcional	30.0 mm
RMPX	Ângulo de rampa máximo	2.0 deg
RoundedUpWeight	Peso do Catálogo	0.400 kg
RP	raio programado	1.8 mm
RPMX	rpm máx.	30000 rpm
tipodehaste	tipodehaste	Combimaster
TDZ	Tamanho do diâmetro da rosca	M12
ZEPF	contagem das aresta periféricas efetivas	4
ZNP	Arestas periféricas na ferramenta	4

Figura D. 1- Dados técnicos das ferramentas de fresagem da Seco.

Anexo E: Propriedades das pastilhas da Seco®

Nome	Descrição	Valor
CCDC	contagem de aresta de corte	2
Designação	Produto - Designação	LPHW060310TR-D06
Designação ANSI	Produto - Designação ANSI	LPHW060310TR-D06
Classe	Classe	MH1000
Classe tipo	Classe tipo	Carbide PVD
IH	Lado da pastilha	Right
ItemNo.	Item No.	02789566
RE	Raio de ponta	1.0 mm
RoundedUpWeight	Peso do Catálogo	0.100 kg
s	Espessura da pastilha	3.2 mm
SSC	Código do tamanho do alojamento da pastilha	0603

Figura E. 1-Propriedades das pastilhas da Seco.

Dados de Corte Material: SMG H11 Fres. faceamento

Número de passes (ae)	Profundidade radial (ae)	Radial offset (Δe)	Número de passes (ap)
1	12.0 mm	1.6 mm	45
Profundidade de corte (ap)	Avanço/dente	Velocidade de corte	Velocidade de corte em DCX
0.44 mm	0.17 mm/dente	95.0 m/min	95 m/min
Tipo de refrigeração	Rotação	Velocidade de avanço	Taxa de remoção de material (Q)
À seco	1210 rpm	823 mm/min	4.39 cm ³ /min

Dados de corte avançados

Material

H11

Acns.inoxidáveis martensíticos

Método de Corte

Fres. faceamento

Outras entradas

Largura de corte radial desejada [0.17 - 16.5]
 mm

Desired radial offset (Δe) [-2.3 - 2.2]
 mm

Número de passes desejado (ap) [40 - 100]

Figura E. 2-Parâmetros de corte recomendados para as pastilhas da Seco.

Dados de corte avançados +

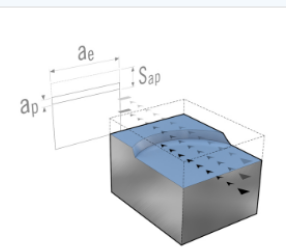
Material	Método de Corte	Outras entradas
<p>H11</p> <p>Aços inoxidáveis martensíticos</p> <p>Selecionar material ></p> <p>HRC (38 - 50 HRC)</p> <p><input type="text" value="45"/> HRC</p>	 <p>Fres. faceamento</p> <p>Seleciona método de corte ></p> <p>Sobremetal A(Sap)</p> <p><input type="text" value="20"/> mm \neq</p>	<p>Largura de corte radial desejada [0.17 - 16.5]</p> <p><input type="text" value="12.0"/> mm</p> <p>Desired radial offset (Δe) [-2.3 - 2.2]</p> <p><input type="text" value="1.6"/> mm</p> <p>Número de passes desejado (a_p) [40 - 100]</p> <p><input type="text" value="45"/></p> <p>Avanço/dente desejado [0.1 - 0.2]</p> <p><input type="text" value="0.17"/> mm/tooth</p> <p>Velocidade de corte desejada [65 - 120]</p> <p><input type="text" value="95"/> m/min</p> <p>Rotação disponível</p> <p><input type="text" value="0"/> rev/min</p>

Figura E. 3-Parâmetros de corte recomendados para as pastilhas da Seco.

Anexo F: Desgaste das pastilhas

- Ensaio 1

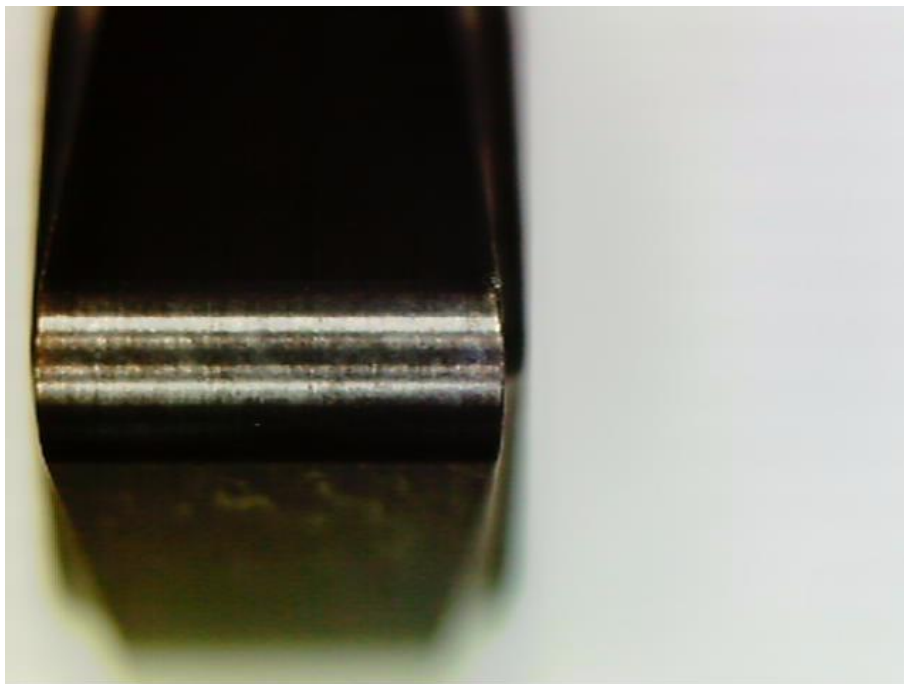


Figura F. 1-Pastilha 4 na 1ª paragem.

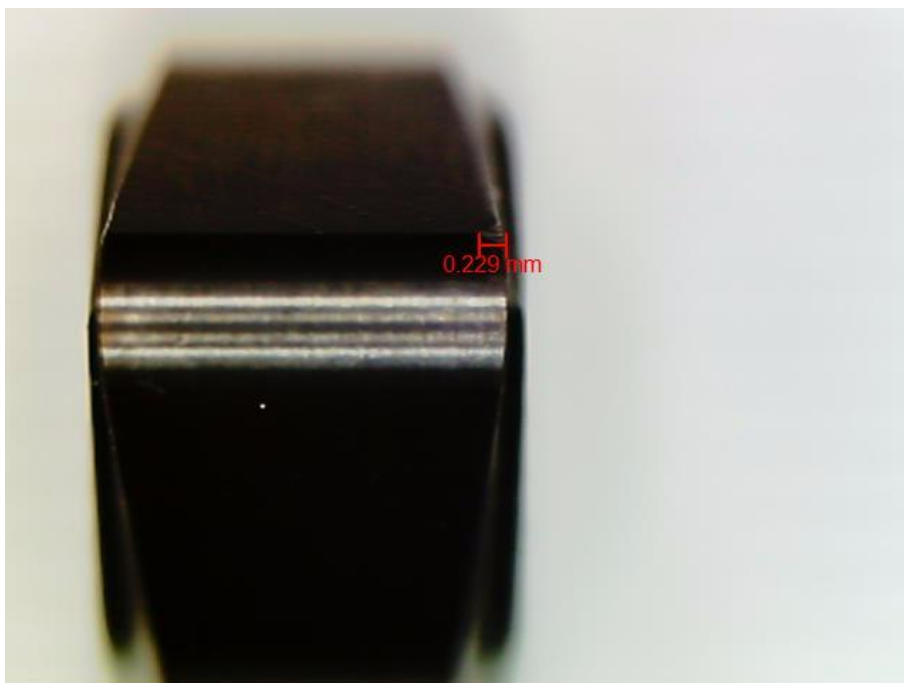


Figura F. 2-Pastilha 4 na 10ª paragem.

- Ensaio 2

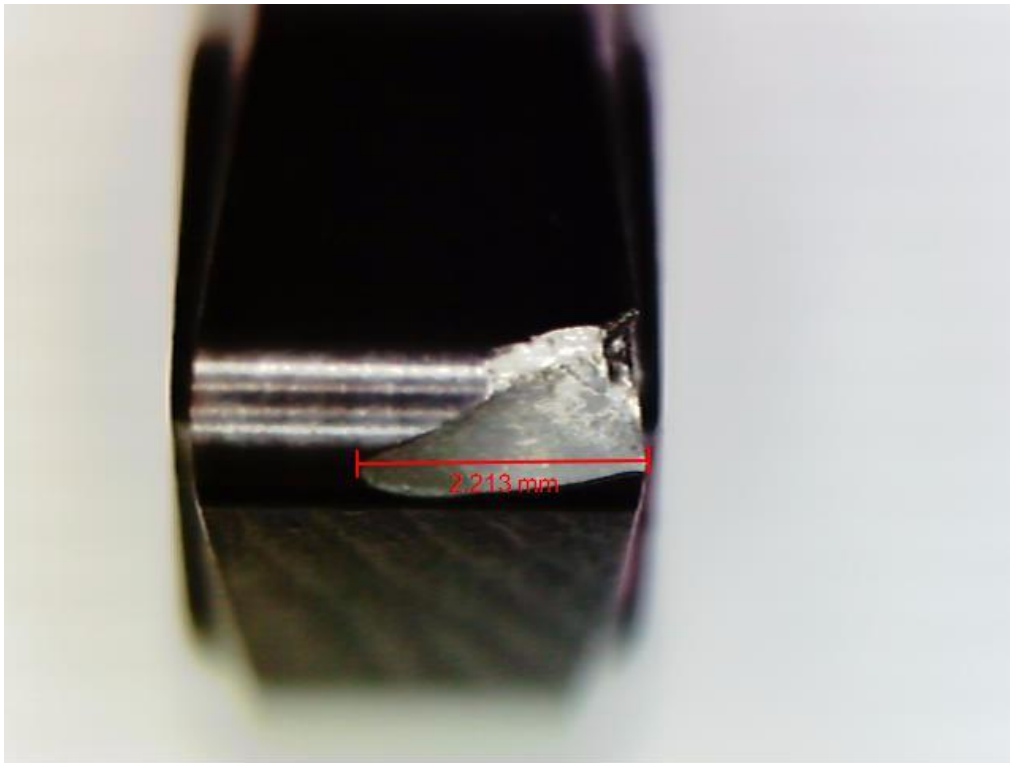


Figura F. 3-Pastilha 2 na 1ª paragem.

- Ensaio 3

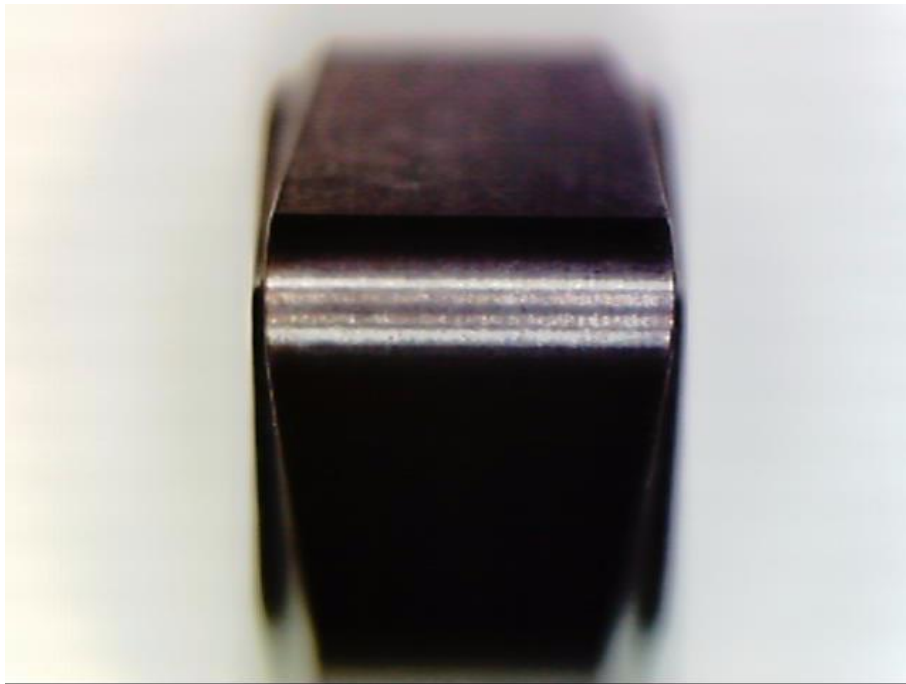


Figura F. 4-Pastilha 4 na 1ª paragem.



Figura F. 5-Pastilha 4 na 3ª paragem.

- Ensaio 4

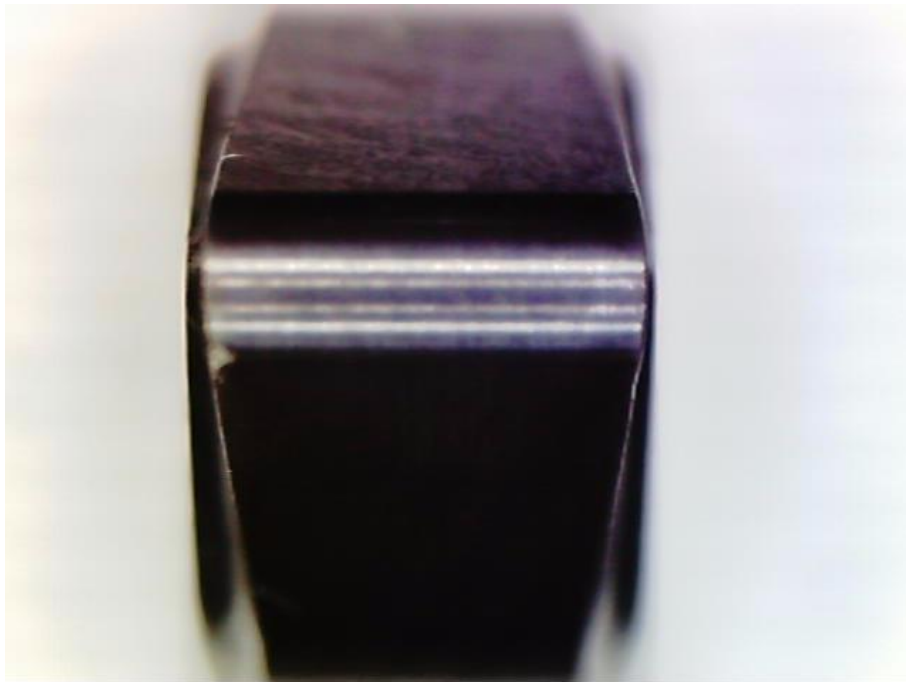


Figura F. 6-Pastilha 4 na 1ª paragem.

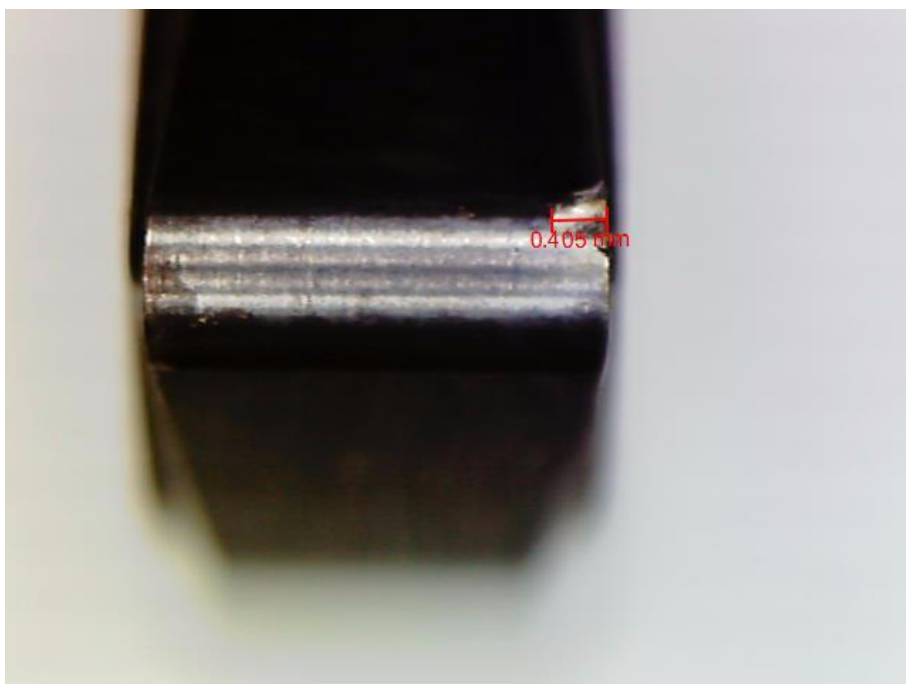


Figura F. 7-Pastilha 4 na 8ª paragem.

- Ensaio 5

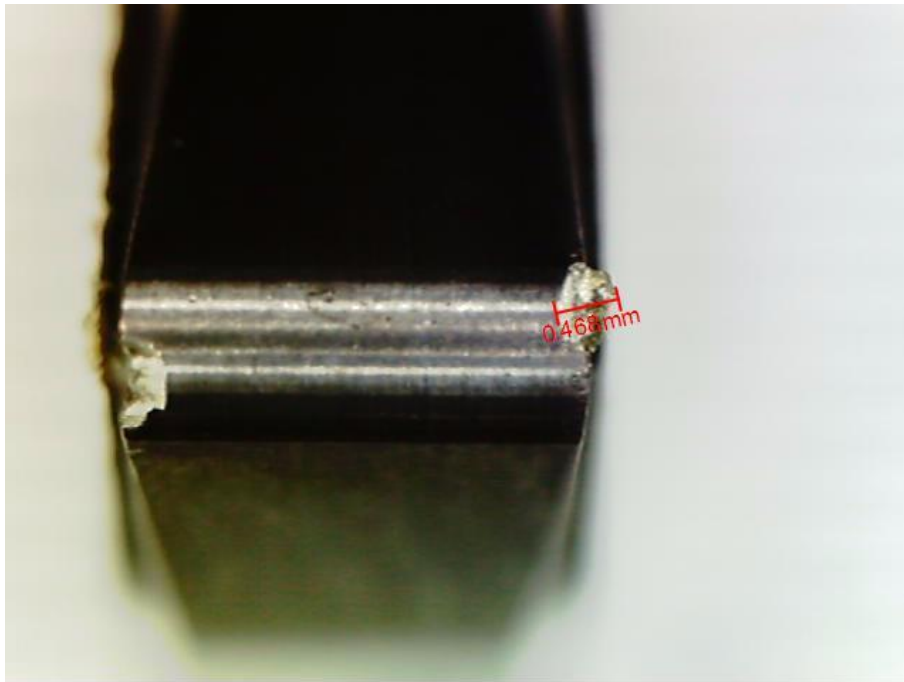


Figura F. 8-Pastilha 1 na 1ª paragem.

- Ensaio 6



Figura F. 9-Pastilha 2 na 1ª paragem.

- Ensaio 7

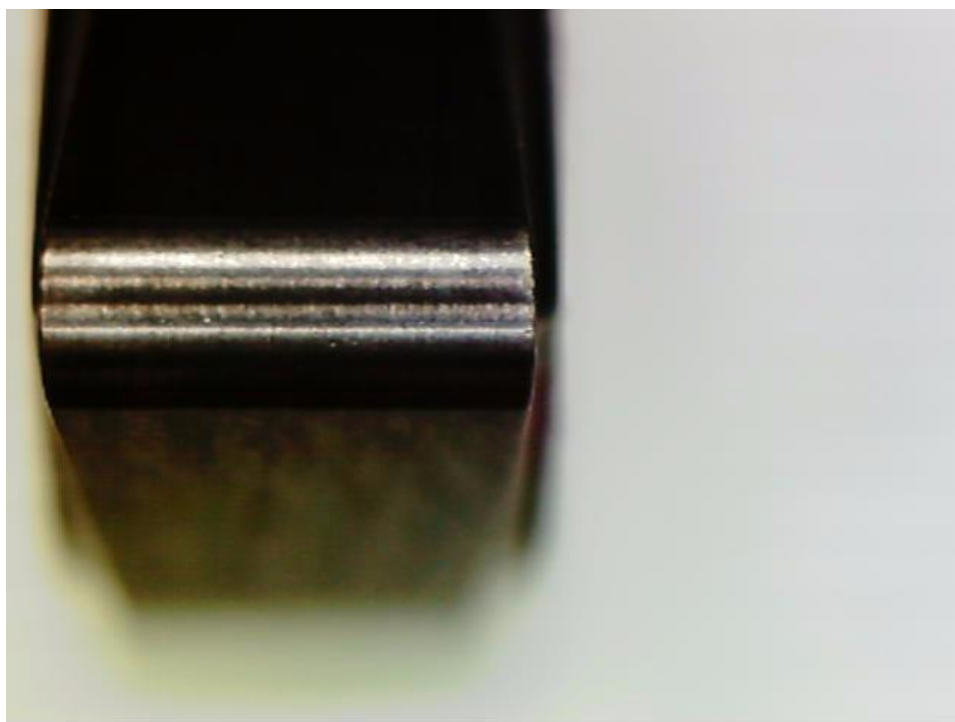


Figura F. 10-Pastilha 4 na 1ª paragem.

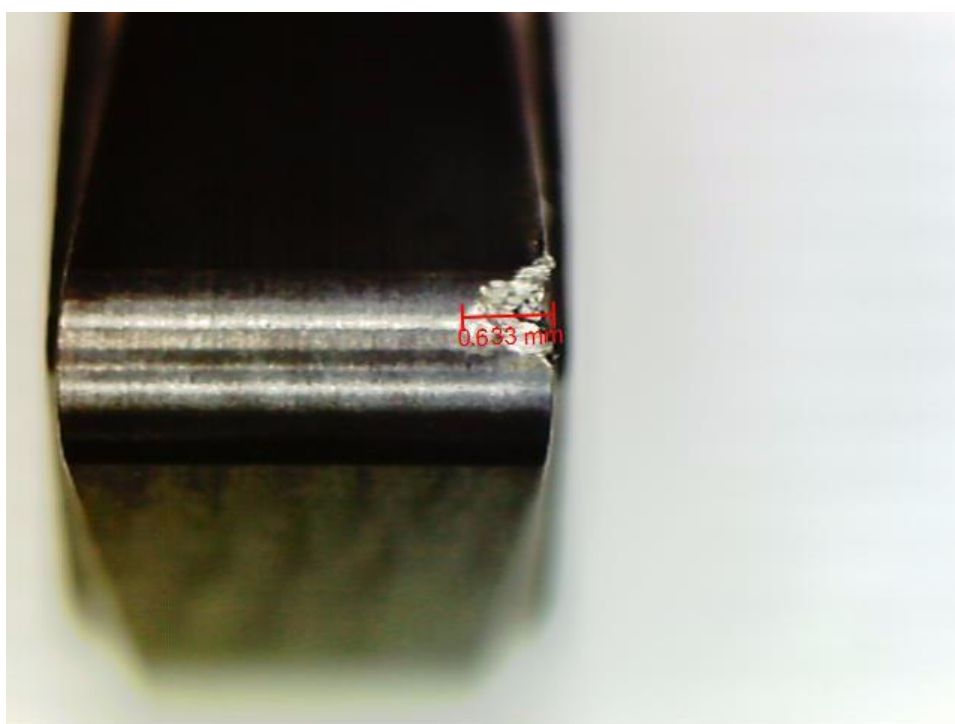


Figura F. 11-Pastilha 4 na 2ª paragem.

- Ensaio 8

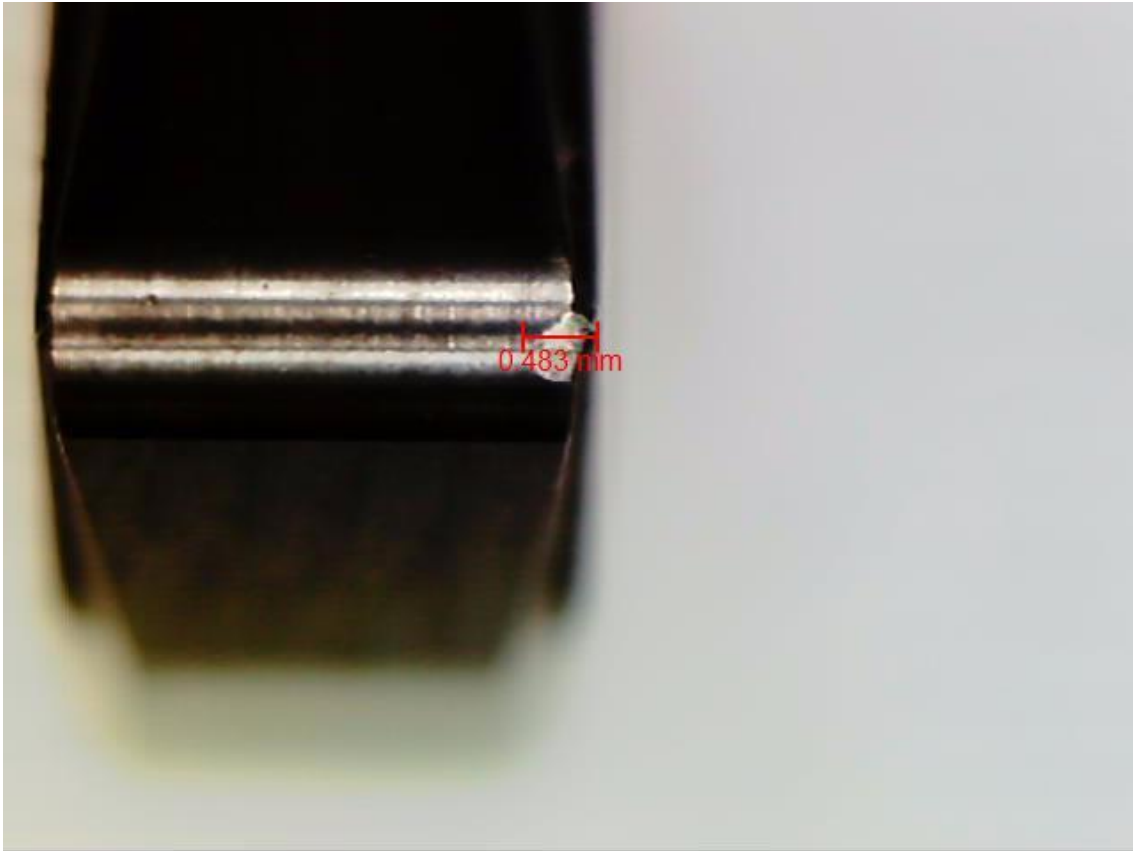


Figura F. 12-Pastilha 2 na 1ª paragem.

- Ensaio 9

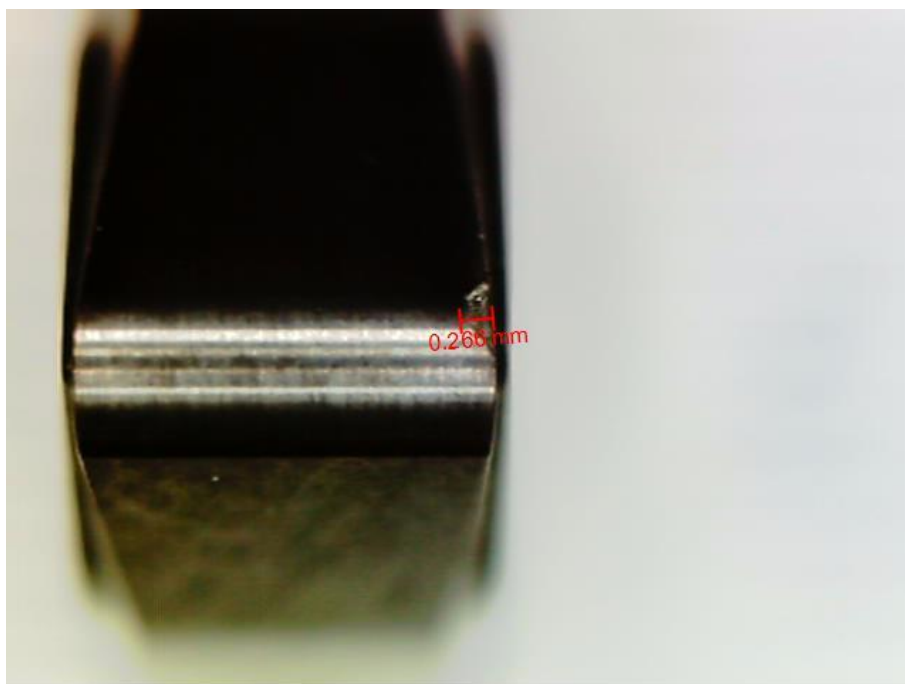


Figura F. 13-Pastilha 3 na 1ª paragem.

- Ensaio 10

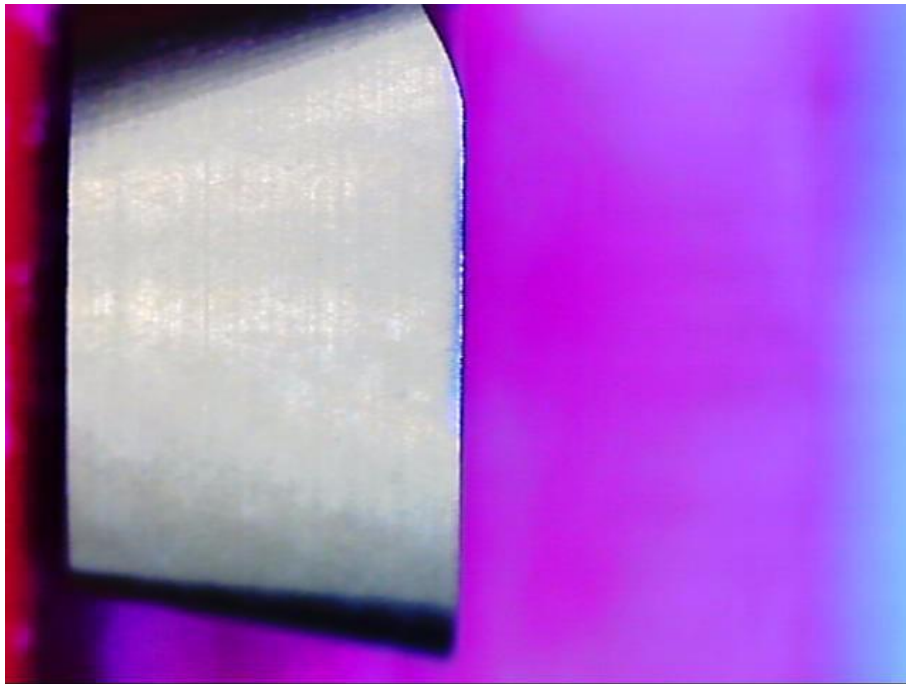


Figura F. 14-Pastilha 4 na 1ª paragem.

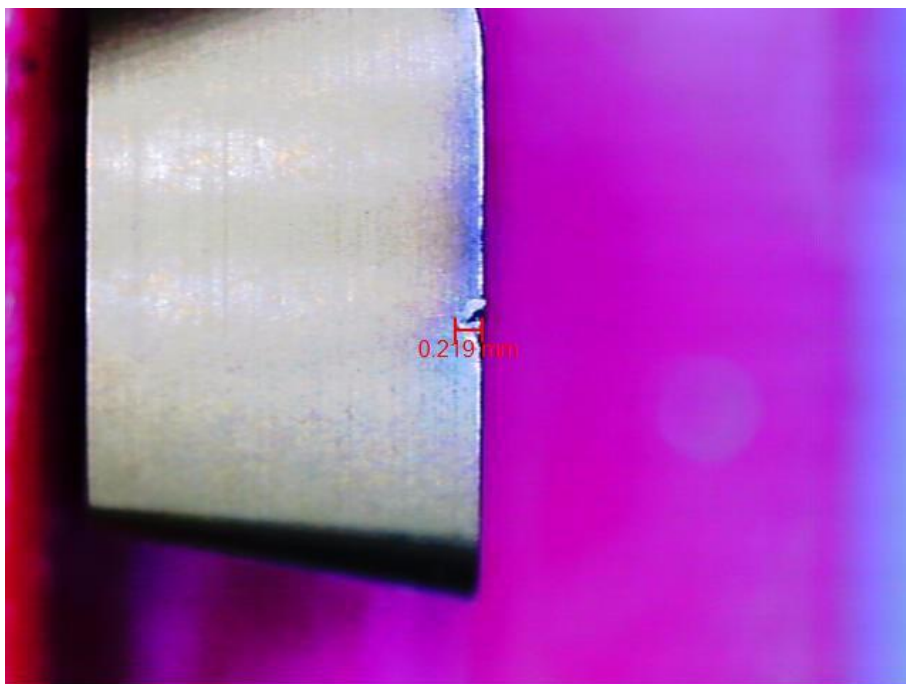


Figura F. 15-Pastilha 4 na 20ª paragem.

- Ensaio 11

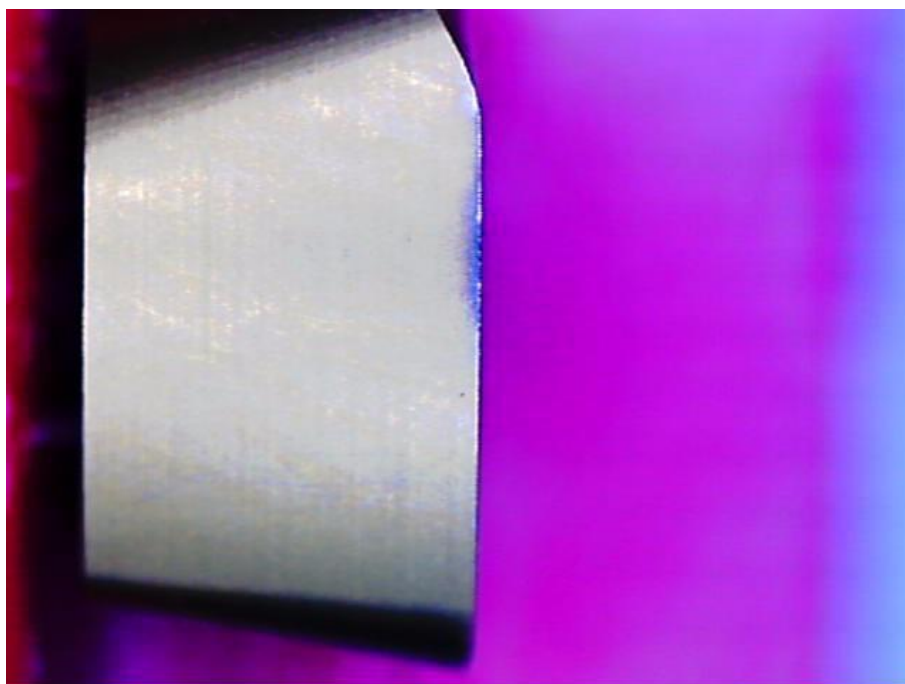


Figura F. 16-Pastilha 1 na 1ª paragem.

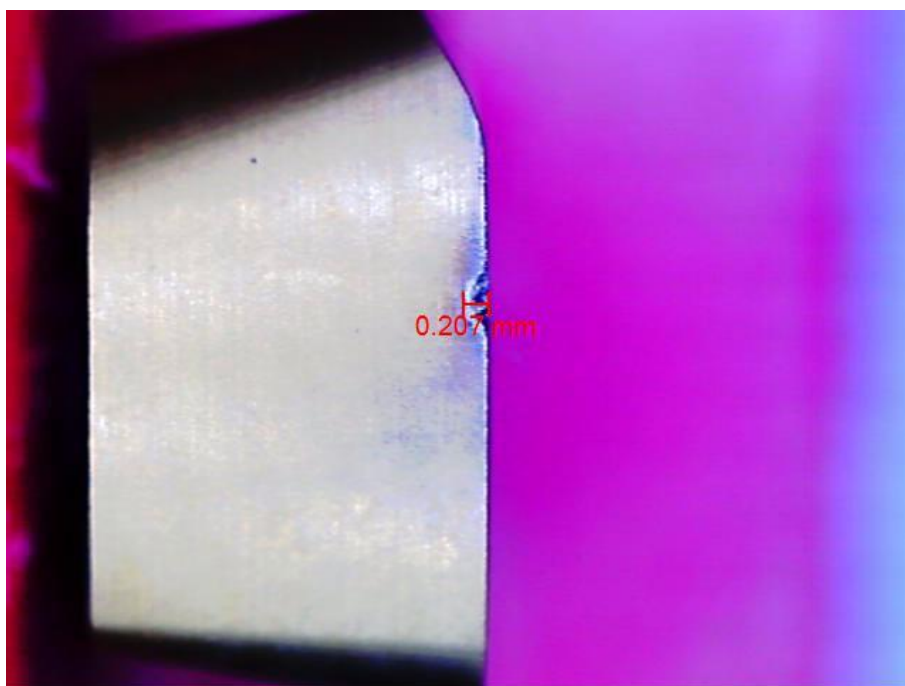


Figura F. 17-Pastilha 1 na 8ª paragem.

- Ensaio 12

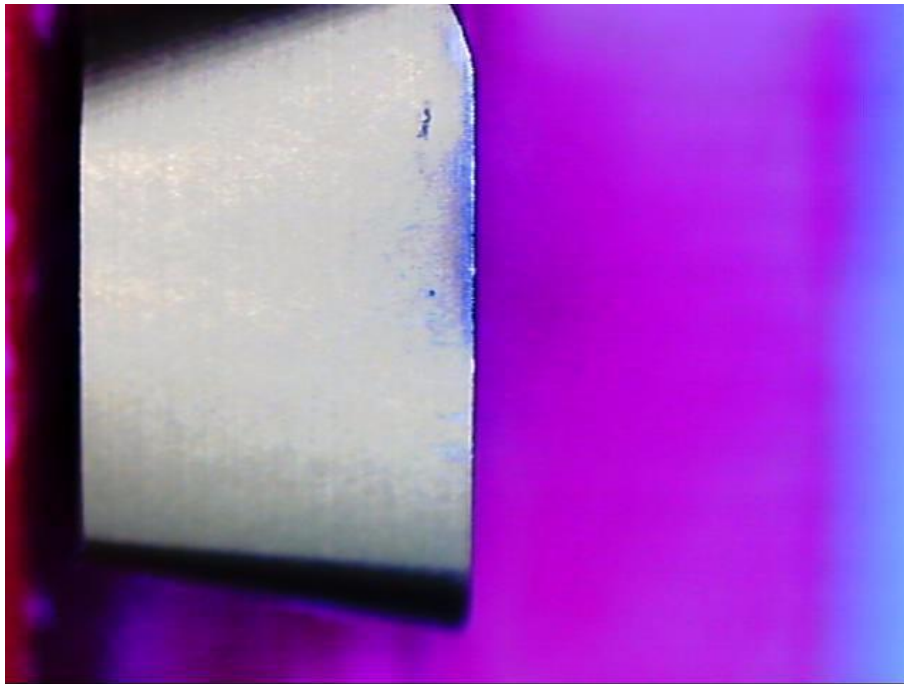


Figura F. 18-Pastilha 3 na 1ª paragem.

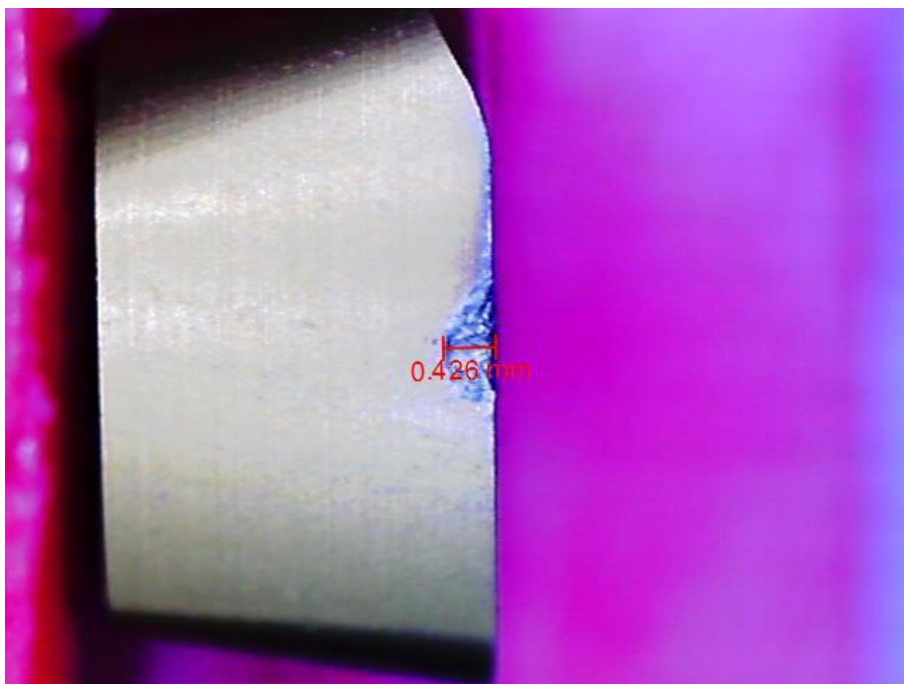


Figura F. 19-Pastilha 3 na 5ª paragem.

- Ensaio 13

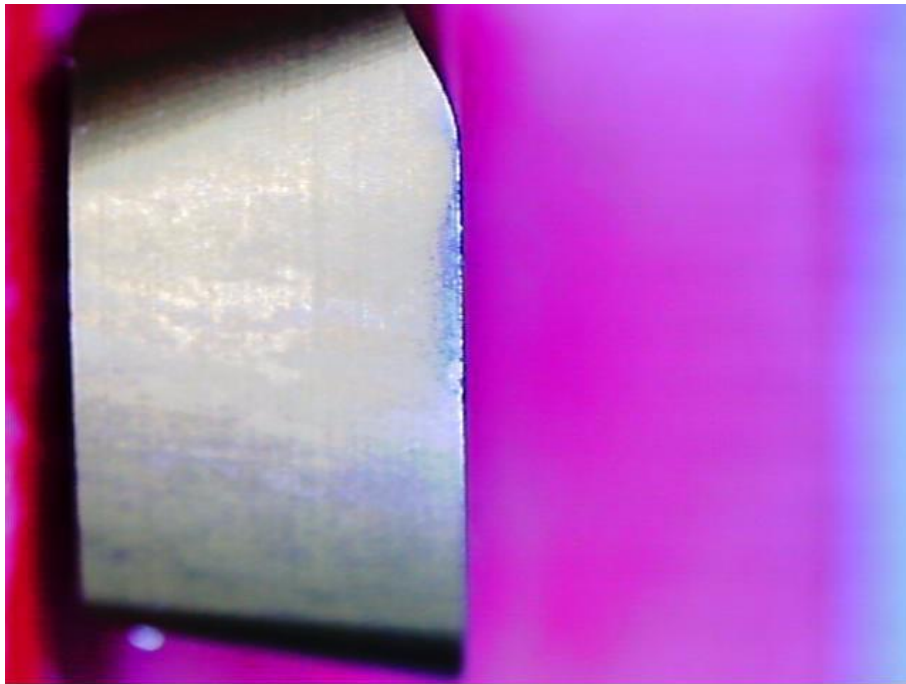


Figura F. 20-Pastilha 1 na 1ª paragem.

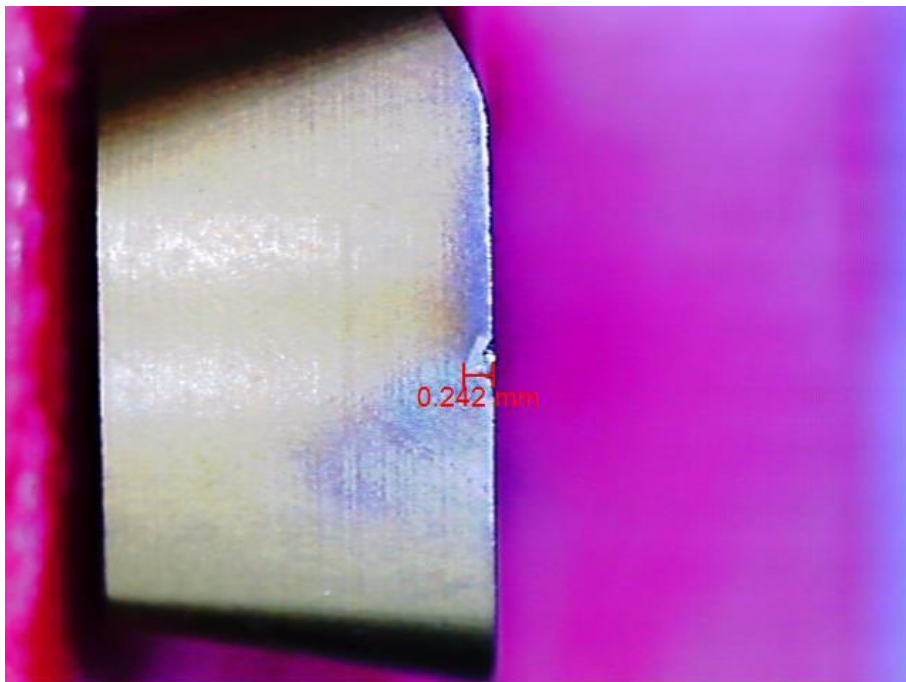


Figura F. 21-Pastilha 1 na 7ª paragem.

- Ensaio 14

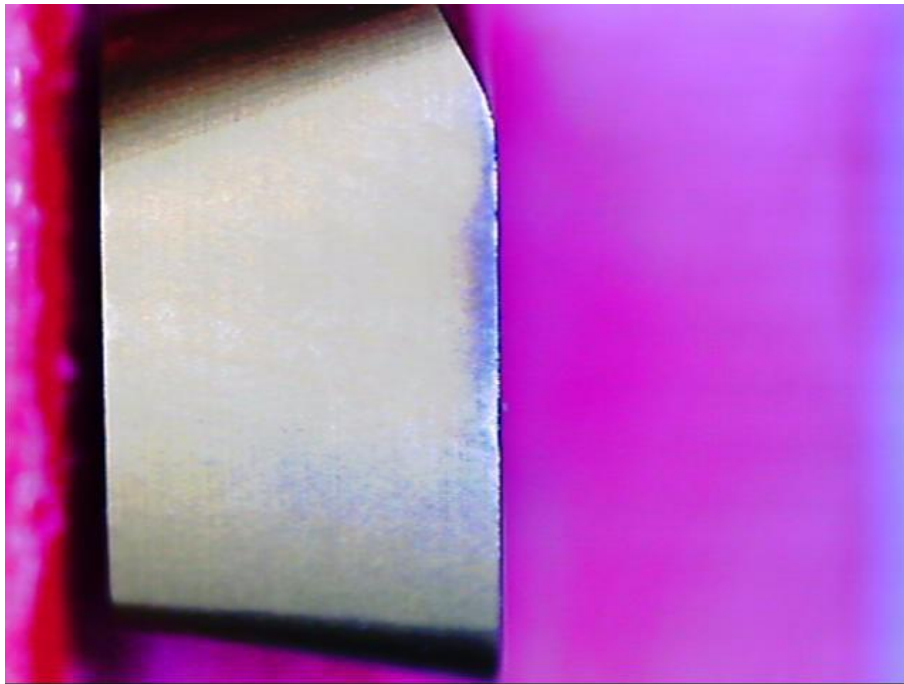


Figura F. 22-Pastilha 2 na 1ª paragem.

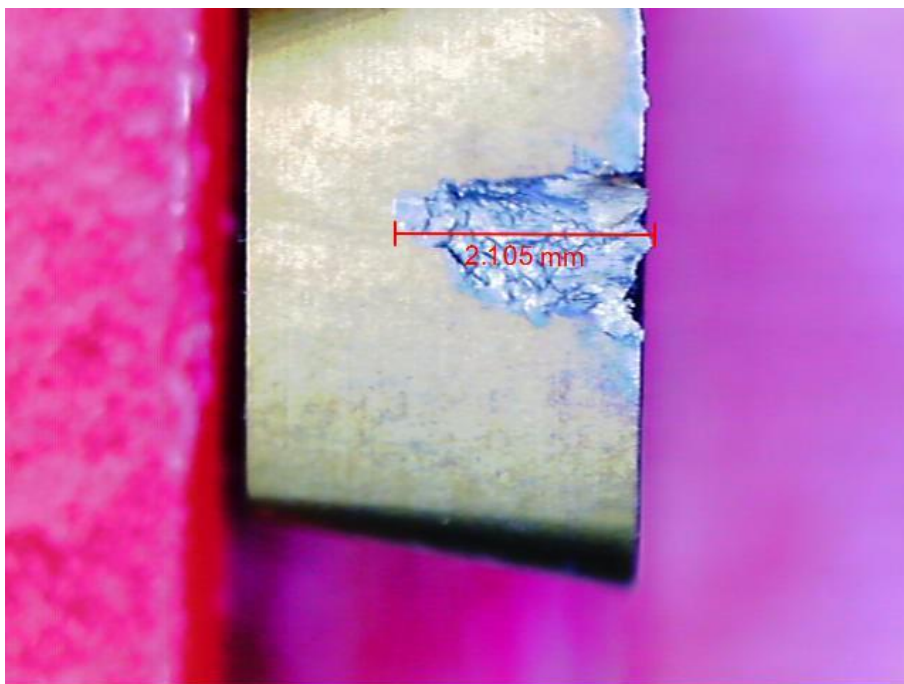


Figura F. 23-Pastilha 2 na 25ª paragem.

- Ensaio 15

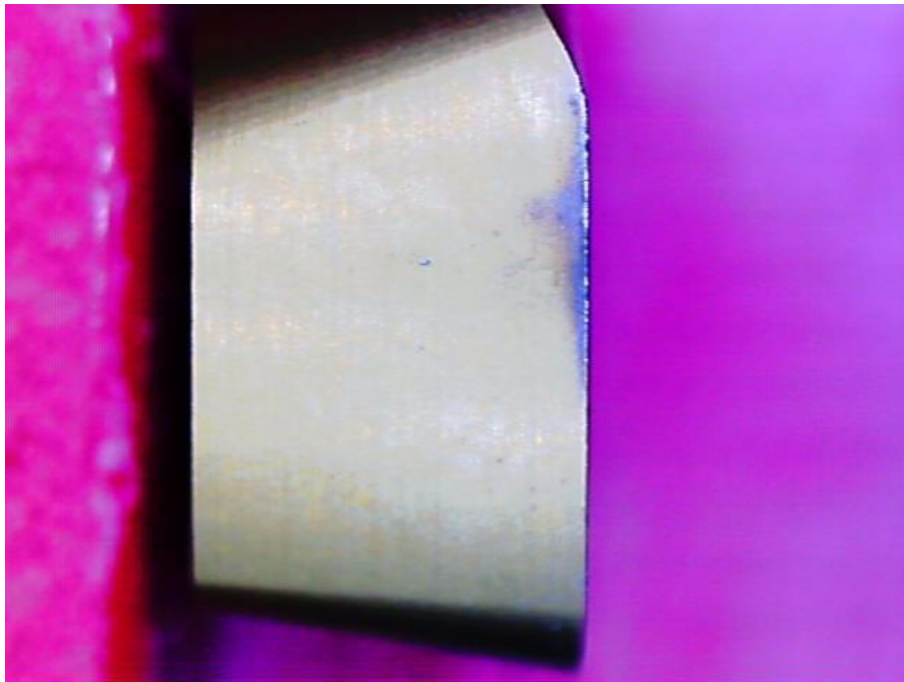


Figura F. 24-Pastilha 1 na 1ª paragem.

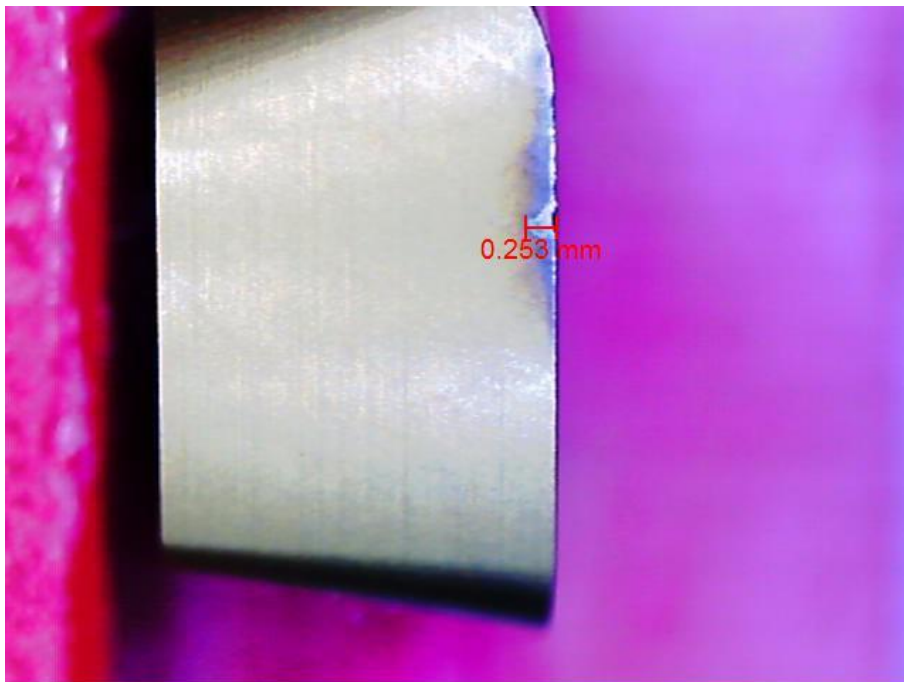


Figura F. 25-Pastilha 1 na 40ª paragem.

- Ensaio 16

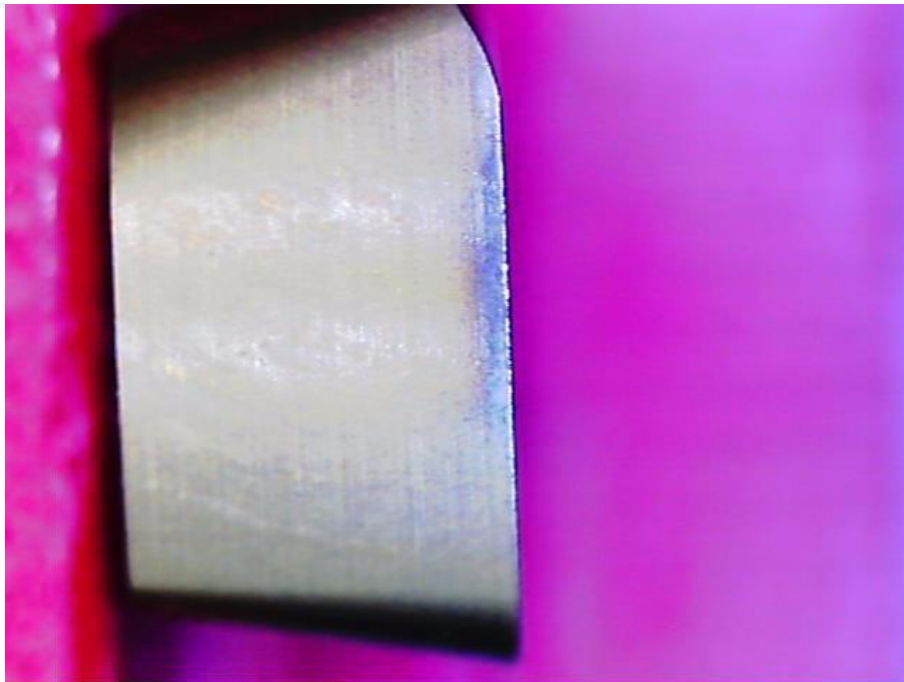


Figura F. 26-Pastilha 4 na 1ª paragem.

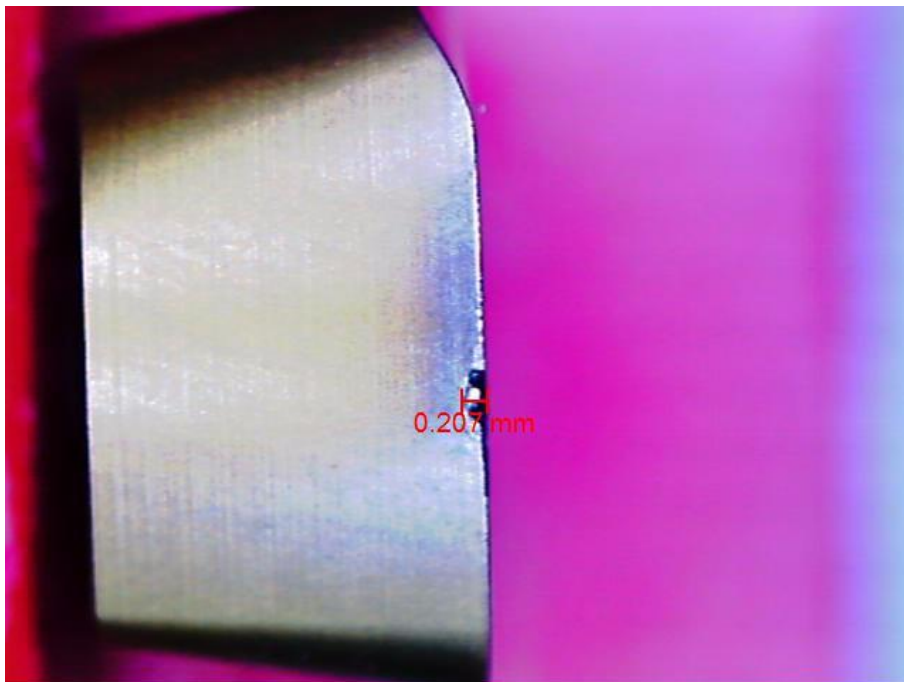


Figura F. 27-Pastilha 4 na 25ª paragem.

- Ensaio 17

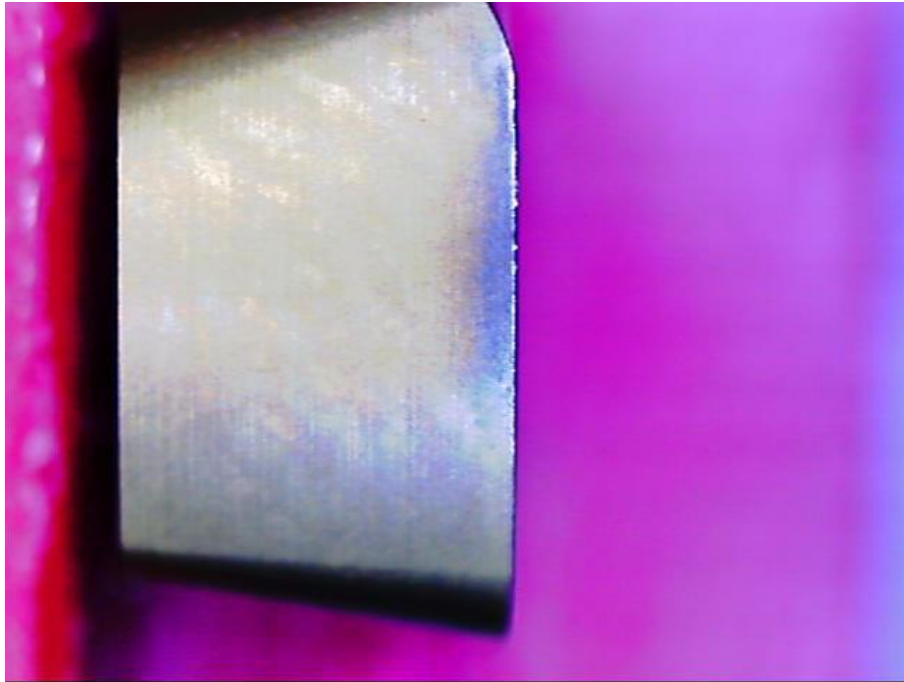


Figura F. 28-Pastilha 2 na 1ª paragem.

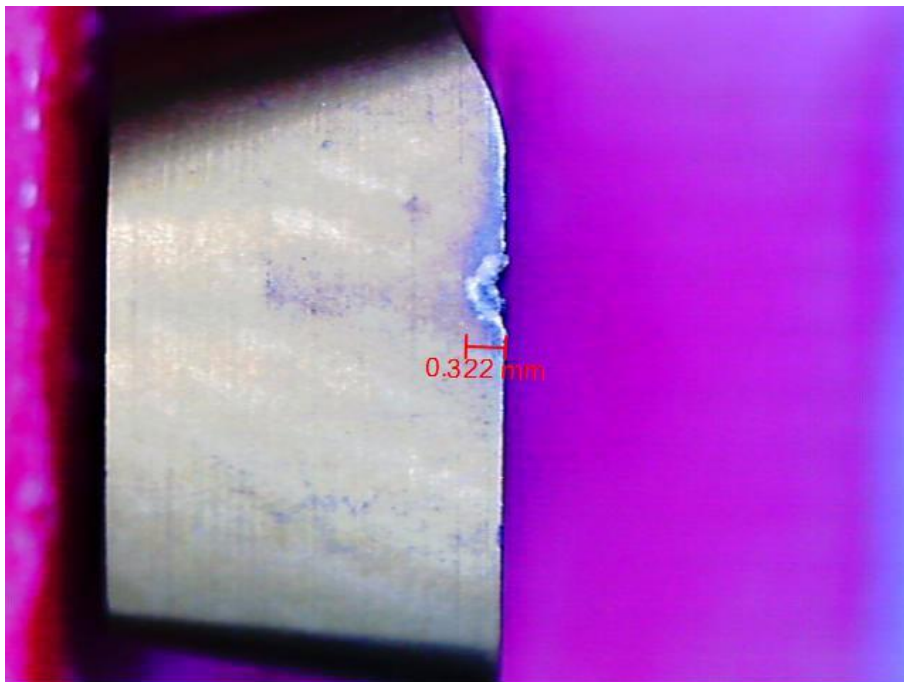


Figura F. 29-Pastilha 2 na 2ª paragem.

- Ensaio 18

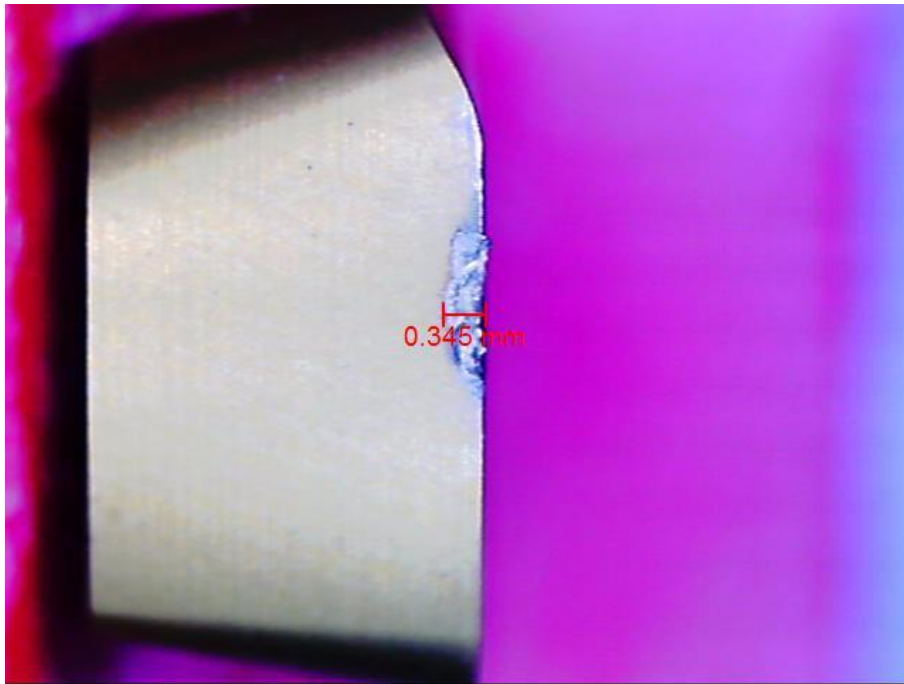


Figura F. 30-Pastilha 3 na 1ª paragem.

Anexo G: Valores e média da rugosidade superficial*Tabela G. 1- Valores médias das posições de leitura da rugosidade superficial.*

Número de ensaio	Média da Posição 1 [μm]	Média da Posição 2 [μm]	Média da rugosidade [μm]
1	2,19	2,11	2,15
2	3,64	2,51	3,08
3	1,77	2,74	2,26
4	1,93	1,96	1,95
5	1,87	1,83	1,85
6	2,15	2,29	2,22
7	2,59	1,89	2,24
8	1,55	1,97	1,76
9	1,72	2,21	1,97
10	0,6	0,53	0,57
11	0,69	0,48	0,59
12	0,86	0,67	0,77
13	0,42	0,57	0,50
14	0,48	0,72	0,60
15	0,71	0,88	0,80
16	0,31	0,31	0,31
17	0,45	0,42	0,44
18	0,46	0,45	0,46

Anexo H: Valores da vida útil das ferramentas

Tabela H. 1- Valores da vida útil das ferramentas de corte.

Ensaio		Vida Util
1	Tempo de cada passagem (s)	46,52
	Nº de vezes que passa por camada	7
	Nº de camadas	3
	Nº de paragens	10
2	Tempo de cada passagem (s)	23,43
	Nº de vezes que passa por camada	7
	Nº de camadas	3
	Nº de paragens	1
3	Tempo de cada passagem (s)	14,77
	Nº de vezes que passa por camada	7
	Nº de camadas	1
	Nº de paragens	3
4	Tempo de cada passagem (s)	22,9
	Nº de vezes que passa por camada	7
	Nº de camadas	3
	Nº de paragens	8
5	Tempo de cada passagem (s)	11,31
	Nº de vezes que passa por camada	7
	Nº de camadas	2
	Nº de paragens	1
6	Tempo de cada passagem (s)	7,42
	Nº de vezes que passa por camada	7
	Nº de camadas	2
	Nº de paragens	1
7	Tempo de cada passagem (s)	15,68
	Nº de vezes que passa por camada	7
	Nº de camadas	2
	Nº de paragens	2
8	Tempo de cada passagem (s)	7,73
	Nº de vezes que passa por camada	7
	Nº de camadas	2
	Nº de paragens	1
9	Tempo de cada passagem (s)	5,02
	Nº de vezes que passa por camada	7
	Nº de camadas	2
	Nº de paragens	1
10	Tempo de cada passagem (s)	47,37
	Nº de vezes que passa por camada	7
	Nº de camadas	2
	Nº de paragens	20
11	Tempo de cada passagem (s)	22,96
		55

	Nº de vezes que passa por camada	6	
	Nº de camadas	3	
	Nº de paragens	8	
12	Tempo de cada passagem (s)	15,12	15
	Nº de vezes que passa por camada	6	
	Nº de camadas	2	
13	Nº de paragens	5	48
	Tempo de cada passagem (s)	22,73	
	Nº de vezes que passa por camada	6	
14	Nº de camadas	3	55
	Nº de paragens	7	
	Tempo de cada passagem (s)	11,08	
15	Nº de vezes que passa por camada	6	73
	Nº de camadas	2	
	Tempo de cada passagem (s)	7,78	
16	Nº de paragens	40	135
	Nº de vezes que passa por camada	7	
	Tempo de cada passagem (s)	15,39	
17	Nº de camadas	3	5
	Nº de paragens	2	
	Tempo de cada passagem (s)	7,52	
18	Nº de vezes que passa por camada	7	1
	Nº de camadas	2	
	Tempo de cada passagem (s)	4,84	
	Nº de paragens	1	

Anexo I: Valores da taxa de produção

De acordo com a equação 3, mencionada no subcapítulo 2.1.4 é possível chegar à tabela seguinte.

Tabela I. 1-Valores calculados para a taxa de produção.

Número de ensaio	Velocidade de avanço [mm/min]	Penetração axial [mm]	Tp [cm³/min]
1	254,65	0,1	0,255
2	509,30	0,2	1,019
3	763,94	0,3	2,292
4	509,30	0,1	0,509
5	1018,59	0,2	2,037
6	1527,89	0,3	4,584
7	763,94	0,2	1,528
8	1527,89	0,3	4,584
9	2291,83	0,1	2,292
10	254,65	0,3	0,764
11	509,30	0,1	0,509
12	763,94	0,2	1,528
13	509,30	0,2	1,019
14	1018,59	0,3	3,056
15	1527,89	0,1	1,528
16	763,94	0,3	2,292
17	1527,89	0,1	1,528
18	2291,83	0,2	4,584

Anexo J: Microscópio utilizado



Figura J. 1- Microscópio utilizado neste estudo.

Tabela J. 1- Características do microscópio.

Caraterísticas	
Modelo	Veho VMS-005-LCD
Ampliação Digital	1200x
Ampliação Ótica	300x
Ecrã	LCD 3.5"
Bateria	Li-on
Autonomia	2 h
Suporta cartões Micro SD	Máx. 32 GB

Anexo K: Rugosímetro utilizado

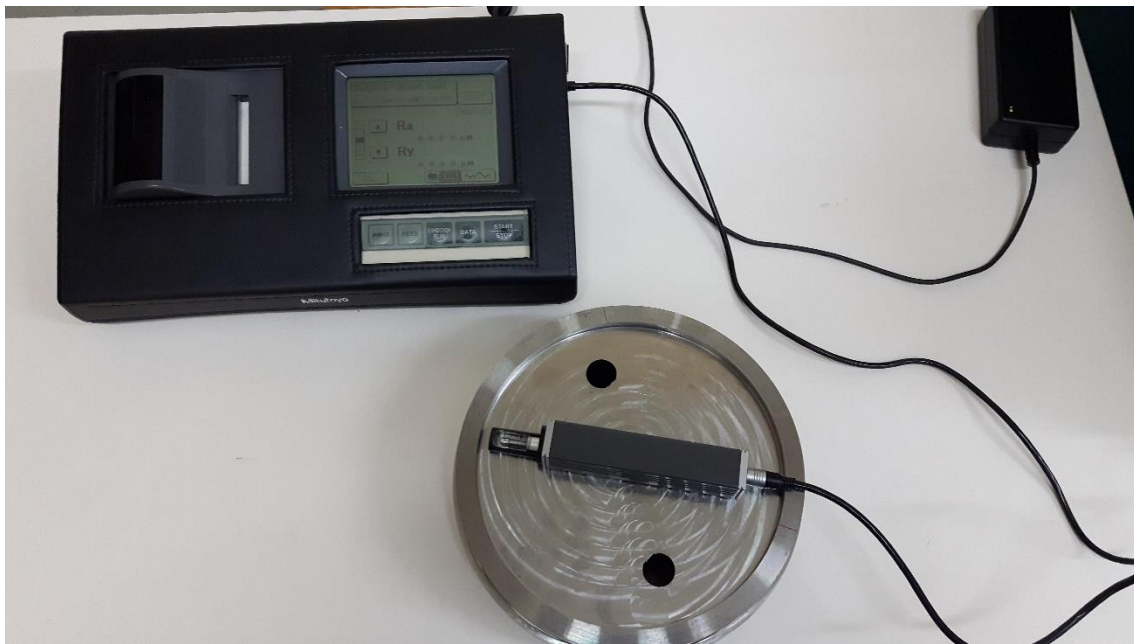


Figura K. 1- Rugosímetro utilizado neste estudo. Modelo: Mitutoyo SJ-301.