

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

FABIANO RAMOS RODRIGUES

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO PROCESSO DE TORNEAMENTO
EXTERNO DO AÇO SAE-1045, COM FERRAMENTAS, PVD, CVD E CERMET**

BENTO GONÇALVES

2019

FABIANO RAMOS RODRIGUES

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO PROCESSO DE TORNEAMENTO
EXTERNO DO AÇO SAE-1045, COM FERRAMENTAS, PVD, CVD E CERMET**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial para
a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica na Universidade
de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Paese

BENTO GONÇALVES

2019

FABIANO RAMOS RODRIGUES

**ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL NO PROCESSO DE TORNEAMENTO
EXTERNO DO AÇO SAE-1045, COM FERRAMENTAS, PVD, CVD E CERMET**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica na Universidade de
Caxias do Sul.

Aprovado em ___/___/___

Banca Examinadora

Prof(a). Dra. Cintia Paese Giacomello
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Evandro Paese
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Alexandre Mendes
Universidade de Caxias do Sul – UCS

BENTO GONÇALVES

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido a dádiva da vida, e me guiado com saúde e sabedoria até esse momento.

Agradeço minha namorada Tamires Andressa Pizzatto, que me acompanha desde o dia do vestibular, sempre me apoiando e entendendo as inúmeras festas, baladas, viagens etc.. que deixamos de realizar em função de tarefas e estudos da graduação, obrigado por tudo e pela parceria e muita paciência comigo.

Aos meus familiares por todos os momentos vividos e palavras de incentivo nessa trajetória em especial ao meu irmão José Ubiratã Ramos Rodrigues, que contribui de forma decisiva no começo de minha formação profissional, me escrevendo e arcando com os custos de meu primeiro curso profissionalizante, “Auxiliar de Mecânica”, no instituto tecnológico do mobiliário Senai- Cetemo. Pois essa foi sem dúvidas a porta de entrada para desbravar e me apaixonar pela área da mecânica.

Aos professores, Mestres e Doutores desta instituição por todo conhecimento teórico e prático dedicado ao curso de engenharia mecânica, alguns serão só professores, mas a maioria são grandes amigos e agora colegas engenheiros.

Ao meu colega e amigo de graduação Juliano Carteri, por ter aberto as portas de sua empresa TECH FOR BRASIL, para contribuir com a usinagem das peças.

Ao meu orientador professor Dr. Evandro Paese, por toda contribuição, ajuda e dicas fundamentais para que esse trabalho pudesse ser realizado, orientações fora de horário, finais de semana, corrigindo e enviando trabalho na madrugada, demonstrando um imenso profissionalismo e amizade com seus orientandos. Ou seja, não é preciso estar com o cartão ponto registrado para ajudar o aluno. Muito obrigado Evandro.

RESUMO

Com aumento tecnológico na área de novos materiais metálicos e compósitos, afim de atender as necessidades e aplicações impostas aos mesmos, se faz necessário estudos de novas ferramentas, métodos e processos, para poder manufacturar esses materiais sem comprometer a sua estrutura e consequentemente sua integridade estrutural. O campo da usinagem é repleto de desafios constantes pois trata-se de uma combinação de matéria prima, maquinas e ferramentas, para a obtenção de peças, produtos e ferramentas. Mundialmente o ramo da usinagem é responsável por inúmeros empregos, uma vez que o processo se encontra diretamente ou indiretamente em muitos produtos manufacturados do planeta. Porém para alcançar os índices de acabamento e produtividade dos materiais, novas ferramentas ou coberturas estão sempre em evolução, buscando atender a usinabilidade dos novos materiais. Neste trabalho será estudado três ferramentas, sendo duas de metal duro com coberturas: CVD (deposição química a vapor) e PVD (deposição física a vapor) e outra de CERMET (ferramenta constituída de metal duro e cerâmica). Todas com a mesma geometria, para realizar análises qualitativos no acabamento superficial do aço SAE-1045, realizado no processo de torneamento externo, variando cobertura, velocidade de corte (m/min), profundidade de corte (a_p), avanço (mm/min) e raio de ponta(r_e). Na usinagem das peças foi utilizado torno CNC e após a usinagem das peças foi analisado o acabamento superficial com rugosímetro modelo SJ-201 Mitutoyo. Com a função *anovan software Matlab*, analisou-se os resultados para os fatores controláveis definidos, destacando que a cobertura que apresentou melhores resultados no acabamento superficial tanto em R_a ou R_z , foi a cobertura de CVD.

Palavras-chave: Usinagem, torneamento externo, ferramentas, coberturas CVD, PVD e CERMET (PVD), Anova.

ABSTRACT

With technological increase in the area of new metallic materials and composites, in order to meet the needs and applications imposed on them, studies of new tools, methods and processes are necessary to be able to manufacture these materials without compromising their structure and consequently their structural integrity. The field of machining is fraught with constant challenges as it is a combination of raw materials, machines and tools to obtain parts, products and tools. Worldwide the machining industry is responsible for numerous jobs as the process is found directly or indirectly in many of the planet's manufactured products. However, in order to reach the finishing and material productivity indexes, new tools or covers are always evolving, seeking to attend the machinability of the new materials. In this work will be studied carbide tools with two covers being these; CVD (chemical vapor deposition), PVD (physical vapor deposition) and CERMET tool. All with the same geometry to perform qualitative analysis on the surface finish of SAE-1045 steel, performed in the external turning process, with a tool WNMG080404 HQ and WNMG080408 HQ, varying coverage, cutting speed (m / min), depth of cut (a_p), feed (m / min) and nose radius (r_e). CNC lathe will be used to make the parts, and later analyzed with SJ-201 Mitutoyo roughness tester, to evaluate and measure the surface roughness of the samples. And so, classify surface finish coating and the best combinations found in the experiments.

Keywords: Machining, external turning, tools, CVD, PVD and CERMET coatings.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Perfil de torneamento externo | 16 |
| Figura 2 – Ferramenta WNMG | 20 |
| Figura 3 – Perfil teórico no torneamento | 20 |
| Figura 4 – Representação das ondulações e micro-irregularidades..... | 22 |
| Figura 5 – Rugosidade média R_a | 23 |
| Figura 6 – Perfil de rugosidade R_a e R_t | 23 |
| Figura 7 – Perfil de rugosidade R_z | 24 |
| Figura 8 – Perfil de rugosidades média com mesmo valor de R_a | 25 |
| Figura 9 – Corpo de prova | 30 |
| Figura 10 – Torno CNC Romi Centur 30D | 30 |
| Figura 11 – Fixação da peça no torno..... | 31 |
| Figura 12 – Corpo de prova usinado | 31 |
| Figura 13 – Insetos utilizados | 31 |
| Figura 14 – Suporte dos insetos | 32 |
| Figura 15 – Calibração do Rugosímetro..... | 32 |
| Figura 16 – Fixação do Rugosímetro e Corpo de Prova..... | 33 |
| Figura 17– Análise da ANOVA para R_a | 36 |
| Figura 18 – Influência da profundidade de corte na Rugosidade R_a | 37 |
| Figura 19 – Velocidade de Corte | 37 |
| Figura 20 – Cobertura das ferramentas..... | 38 |
| Figura 21 – Raio de ponta..... | 38 |
| Figura 22 – Avanço da ferramenta | 39 |
| Figura 23 – a_p , V_c , r_e | 39 |
| Figura 24 – a_p , Cobertura, r_e | 40 |
| Figura 25 – V_C , Cobertura, r_e | 40 |
| Figura 26 – V_C , Cobertura | 41 |
| Figura 27 – Profundidade de corte, Velocidade de corte | 41 |
| Figura 28 – Profundidade de corte, Cobertura | 42 |
| Figura 29 – a_p , Raio de ponta | 42 |
| Figura 30 – Cobertura e Raio da ponta..... | 43 |
| Figura 31 – Análise de variância para R_z | 45 |
| Figura 32 – Profundidade de corte | 46 |

| | |
|--|----|
| | 8 |
| Figura 33 – Velocidade de corte..... | 46 |
| Figura 34 – Cobertura da ferramenta..... | 47 |
| Figura 35 – Raio de ponta..... | 47 |
| Figura 36 – Profundidade de corte e Cobertura da ferramenta..... | 48 |
| Figura 37 – Velocidade de corte e Cobertura da ferramenta..... | 48 |
| Figura 38 – Cobertura e Raio de ponta da ferramenta..... | 49 |
| Figura 39 – Profundidade de corte, Cobertura e Raio de ponta | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Características do SAE-1045 | 14 |
| Tabela 2 – Dados experimentais ao acaso | 26 |
| Tabela 3 – Fatores controláveis e dados de rugosidade R_a | 34 |
| Tabela 4 – Fatores controláveis e dados de rugosidade R_z | 44 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 11 |
| 2. | PROJETO DE PESQUISA | 12 |
| 2.1 | TEMA..... | 12 |
| 2.2 | JUSTIFICATIVA DO TEMA..... | 12 |
| 2.3 | OBJETIVOS DO TRABALHO | 13 |
| 2.3.1 | Objetivo geral | 13 |
| 2.3.2 | Objetivos específicos..... | 13 |
| 3. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 14 |
| 3.1 | AÇO..... | 14 |
| 3.1.1 | Usinagem | 15 |
| 3.1.2 | Torneamento..... | 15 |
| 3.1.3 | Torneamento de desbaste e de acabamento | 16 |
| 3.1.4 | Movimentos na usinagem | 17 |
| 3.2 | FERRAMENTAS COM COBERTURAS PVD, CVD E CERMET (PVD). | 19 |
| 3.2 | Ferramenta WNMG 08040x HQ | 20 |
| 3.3 | Relação das variáveis práticas com a rugosidade | 20 |
| 3.3.1.1 | Parâmetros de rugosidade | 21 |
| 3.4 | ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)..... | 25 |
| 1.5 | ESTADO DA ARTE..... | 28 |
| 2. | MATERIAIS E MÉTODOS | 29 |
| 5. | RESULTADOS | 35 |
| 5.1 | CONCLUSÃO..... | 50 |
| 5.1.1 | SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS | 51 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 52 |
| | APÊNDICE - A | 53 |

1. INTRODUÇÃO

Usinagem pode ser considerada uma das atividades de manufatura de peças e acessórios mais utilizada no mundo. Dentre os processos de usinagem, existe o torneamento externo, sendo descrito como um movimento de translação e rotação entre materiais com resistência mecânica distintas entre si, no caso a ferramenta com maior resistência mecânica, comparada a da matéria prima a ser usinada. No campo da usinagem existem diversas maquinas e acessórios que se complementam, tornando possível a realização de peças e acessórios de alta complexibilidade.

Usinar consiste no ato de dar forma geométrica a uma matéria prima, nesse processo pode ou não ocorrer a remoção de material. Quando ocorre remoção, a essa atribui-se o nome de cavacos que são pequenas porções retiradas da peça que está sendo usinada. Com o avanço tecnológico no ramo da manufatura de peças através de usinagens, estudos, experimentos e análises são cada vez mais utilizados para definir melhores condições de manufaturar as peças.

Segundo Mesquita (1992), a finalidade da usinagem em um determinado material ou produto visa garantir uma superfície de acabamento, apresentando condições superficiais (textura) e subsuperficiais (integridade), de acordo coma aplicação e necessidade da peça ou acessório fabricado.

Devido às exigências dimensionais e produtivas das peças e acessórios, é muito importante analisar os fatores que estão envolvidos nas aplicações de usinagens. Com isso será avaliado nesse trabalho a influência de alguns fatores controláveis nos resultados de acabamentos superficiais das peças.

Dependendo da aplicação da peça, o acabamento superficial é importantíssimo para seu funcionamento, pois as marcas deixadas pelos processos de usinagem podem se tornar em concentradores de tensões ou até mesmo micro-trincas. As marcas deixadas na peça pela ferramenta de corte são denominadas de rugosidades.

Para a verificação dos dados obtidos no acabamento superficial, será utilizado o rugosímetro, aparelho utilizado para a quantificar a textura superficial da peça. Esses dados serão utilizados para realizar o método de análise de variância (ANOVA), e assim quantificar quais são os fatores que apresentam maior influência no acabamento superficial de uma peça usinada em aço SAE-1045.

Segundo Davim (2008), está comprovado pelas oficinas modernas que o maior sucesso em usinagem foi alcançado devido a inúmeros estudos sobre ferramentas e máquinas de usinagens, nas ferramentas novos materiais e geometrias de corte, realizando análises das diversas influências que a mesma sofre durante o processo de corte. E nas máquinas o grau de rigidez e amortecimentos da mesma, em conjunto determinam o grau e a qualidade do acabamento de uma determinada superfície. E na prática os equipamentos ou máquinas que operam com menor níveis de vibrações podem explorar melhor a capacidade de corte das ferramentas.

2. PROJETO DE PESQUISA

2.1 TEMA

Análise quantitativa do acabamento superficial, de um corpo de prova de aço SAE-1045, fabricado através do processo de torneamento externo. Avaliando a influência dos parâmetros de corte, e geometria da ferramenta sobre o acabamento superficial, verificando se existe relação entre coberturas e parâmetros de corte das ferramentas com a rugosidade superficial R_a e R_z da peça.

2.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Avaliar de maneira empírica a cobertura, geometria e os parâmetros de corte das ferramentas, que resultam no melhor acabamento superficial de uma peça usinada no processo de torneamento.

O acabamento superficial de uma peça ou acessório está diretamente ligado à sua funcionalidade e aplicação. Na indústria a cada dia os processos de manufaturas precisam ser mais efetivos, resultando em acabamentos superficiais de altíssima qualidade, afim de garantir os ajustes necessários entre peças e componentes, principalmente entre peças de deslizamentos mútuos, como buchas, rolamentos, guias lineares e hastes de pistões hidráulicos e ou pneumáticos.

Além destes fatores, será possível aplicabilidade de técnicas teóricas estudadas no curso de engenharia mecânica, da Universidade de Caxias do Sul UCS-CARVI, na disciplina de usinagens mecânicas. Com a aplicação de ferramentas de usinagens, em processos como: torneamento, fresamento e usinagens em máquinas convencionais e CNC,s (comando numérico computadorizado), aplicando conceitos de vários parâmetros de corte.

Verificar qual ferramenta e fatores controláveis produziram a melhor condição para acabamento superficial nas peças usinadas, realizando um paralelo de qual é a melhor cobertura das ferramentas para essa aplicação.

Atualmente existe uma extensa variedade e diversos fabricantes de ferramentas para usinagens, por isso é de extrema importância que se conheça todas as características das ferramentas que estão disponíveis para a aplicação industrial de cada empresa ou setor, com isso pode-se ter ganhos produtivos e de qualidade nos processos desenvolvidos.

Para o profissional que pretende atuar nos setores de manufatura através de usinagem é indispensável possuir o maior conhecimento possível no ferramental e maquinário disponível em determinada organização ou empresa, pois a usinagem com dados e parâmetros fora do recomendado pelo fabricante podem trazer desgastes prematuros e conseqüentemente vibrações na superfície que está sendo usinado.

2.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.3.1 Objetivo geral

Realizar análise de rugosidade superficial em peças usinadas através do processo de torneamento externo do aço SAE-1045 e realizar a análise dos dados experimentais. Para identificar quais os fatores controláveis resultam nos melhores acabamentos superficiais. Identificar os parâmetros de corte, geométricos e materiais das ferramentas que mais influenciam na rugosidade superficial da peça.

2.3.2 Objetivos específicos

- a) definir de um modelo de corpo de prova;
- b) definir os fatores controláveis utilizados para a confecção dos corpos de prova;
- c) usinar os corpos de prova;
- d) medir a rugosidade superficial dos corpos de prova;
- e) realizar a análise de variância das rugosidades;
- f) definir as condições para obtenção da melhor qualidade superficial.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo será apresentado o referencial teórico, utilizado para a realização deste trabalho, tendo como principal objetivo, identificar se o fator controlável de cobertura das ferramentas, possui ou não contribuições para o acabamento, assim como quais são os fatores que possuem maior influência no aspecto de acabamento superficial de uma peça de SAE-1045, realizada através do processo de torneamento externo.

3.1 AÇO

Aços podem ser determinados como uma mistura de ferro e carbono, a esse se denomina liga metálica, nos materiais chamados de aço carbono, a concentração do carbono varia de 0,05% a 2,00%. Acima deste valor são denominados de ferro fundido, também são utilizados elementos de liga na fabricação dos aços, para atender alguma finalidade específica, como por exemplo, inserção de silício, melhora a usinabilidade do aço (UNTERWEISER, 1982). Segundo Ogata 2003.

Mundialmente existem inúmeras normas para a classificação dos aços, podendo ser pela estrutura, grupo ou aplicação, no Brasil a norma ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), baseia-se nas normas AISI e SAE, nesse sistema os aços são classificados com numeração, de maneira que os dois primeiros indicam o teor da liga e os dois últimos o teor de carbono que contem na liga, para identificar o valor real do carbono na liga divide-se os dois últimos números por 100, obtendo assim a porcentagem do carbono.

SAE-1045 é um aço para beneficiamento com baixa temperabilidade, baixa penetração de dureza na seção transversal, possui boa resistência mecânica e resistência a fratura, em geral é utilizado com durezas de 180 à 300HB composição química Tabela 1. Para forjamento deste aço trabalhar com temperaturas de 870°C a 1240°C, para normalização temperatura entre 880 a 900°C com duração de 1 hora para cada 25mm, resfriar ao ar (GERDAU GGD1045, 2019).

Tabela 1 - Características do SAE-1045

| SAE | Características | | | | | | Composição Química | | | |
|------|-----------------|----------------------|---------------|------------|---------------|-----------------|--------------------|-----------|-----|-----|
| | Usinabilidade | Resistência Mecânica | Forjabilidade | Tenacidade | Soldabilidade | Temperabilidade | C | Mn | P | S |
| 1045 | | | | | | | 0.42/0.50 | 0.60/0.90 | máx | máx |

Fonte: adaptado de Gerdau (2019)

Propriedades do aço SAE-1045 em seu estado normalizado (Gerdau 2019).

Dureza Brinell – 170 - 210 HB

Resistência a Tração – 540 - 700 MPa

Limite de Escoamento – 385 MPa

Alongamento Total – 30%

Condições de Fornecimento – Fornecimento com dureza máxima de 260HB.

3.1.1 Usinagem

Segundo Machado *et al.* (2011) usinagem é definido por operações que proporcionam à peça, forma geométrica e tamanho, tendo como fator a retirada de cavacos da peça, transformando matéria prima bruta ou semiacabada em produtos finais. Cavaco pode ser definido, como a porção de material retirado da peça através de uma ferramenta, este apresenta formas geométricas irregulares.

O aço que será abordado nesse trabalho é aço SAE-1045, considerado um aço comum de média resistência mecânica, pouca temperabilidade, porém muito utilizado em componentes estruturais de máquinas, virabrequins, eixos, peças forjadas. (Aços Gerdau 2019)

Na usinagem a escolha correta dos parâmetros de corte, maquinário adequado para a operação, utilização de novos materiais escolha da geometria da ferramenta, estratégia de corte adequadas ao processo determinam fatores reais de rendimento produtivo.

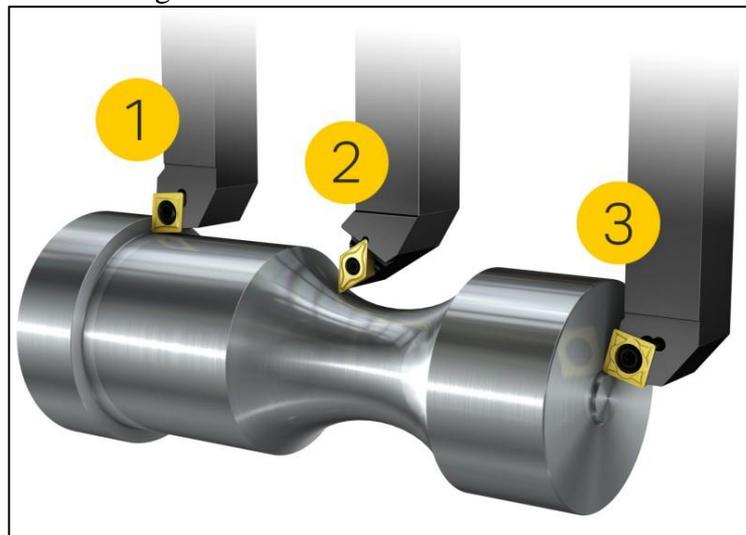
3.1.2 Torneamento

Segundo Ferraresi (1970), considera-se torneamento mecânico o processo que utiliza ferramentas monocortantes, visando obter peças e ou acessórios através da revolução de superfícies ou seja a peça rotaciona sobre um eixo fixo, descrito como sendo o eixo principal da máquina, e simultaneamente a ferramenta se desloca numa trajetória coplanar com o eixo referido da máquina.

No torneamento as operações de usinagens podem ser de desbaste ou acabamento, e estão relacionadas com diversos fatores, principalmente a geometria da ferramenta e o raio de ponta. Para o desbaste a maior atenção é na taxa de remoção de material, que fica restrita pela potência da máquina e da ferramenta. Já no acabamento, quando é removido o sobremetal deixado na operação anterior, a qualidade final da peça possui características prioritárias (MACHADO *et al.* 2011)

Um dos processos de usinagem mais conhecido e utilizado é o processo de torneamento externo, sobre este as exigências de controle da qualidade dos cavacos e segurança de operacionalidade são altas, são divididos em três áreas; torneamento longitudinal, de perfil e de faceamento. Torneamento longitudinal (1), nesse o movimento de avanço da ferramenta ocorre ao longo do eixo de rotação da peça, desta forma o diâmetro de usinagem será fixo no comprimento da peça usinada. Torneamento de perfil (2), nesse o avanço a ferramenta varia ao longo do eixo de rotação da peça e no sentido radial da mesma de forma simultânea, resultando assim em perfis de usinagens; cônicas, abaulados, chanfros e etc... E o torneamento de faceamento (3), ocorre no sentido perpendicular do eixo de rotação da peça, onde a ferramenta avança no sentido radial da peça (SANDVIK, 2017) apresentado na Figura 1.

Figura 1 Perfil de torneamento externo



Fonte: adaptado Sandvik Coromant do Brasil (2017)

3.1.3 Torneamento de desbaste e de acabamento

O desbaste é a operação em que a peça é presa no torno e possui movimentos de rotação enquanto a ferramenta de corte é aproximada da peça com uma taxa constante ao longo do eixo da barra, removendo uma camada do material formando assim um cilindro ou superfícies com geometrias mais complexas (TRENT, 2000).

Segundo Trent (2000), o principal parâmetro é a velocidade de corte podendo ser este ajustado de acordo com as condições necessárias de acabamento. A profundidade de corte é introduzida conforme o tamanho da barra e tamanho final da peça a ser produzida.

Processo de acabamento é a operação de usinagem destinada a obter na peça, as dimensões finais ou acabamento superficial especificado, ou ambos conforme NBR 6175. É a última operação que a peça recebe no torneamento no quesito de acabamento superficial, tendo a função de remover as imperfeições deixadas pelos processos de desbastes, assim como garantir as dimensões funcionalidades e características superficiais da mesma. Nesse processo são utilizadas velocidades de corte (V_c) elevadas e profundidade de corte (a_p) baixas comparadas a operação desbaste, e a geometria da ferramenta geralmente é diferente possuindo menor raio de ponta (r_ϵ).

3.1.4 Movimentos na usinagem

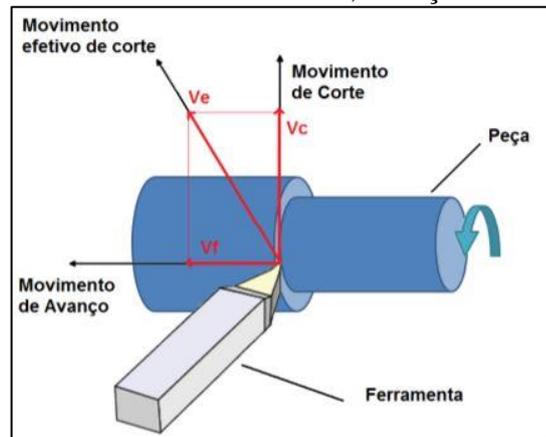
Os movimentos entre a ferramenta e a peça durante a usinagem são aqueles que permitem a ocorrência do processo de usinagem. Por convenção, os movimentos sempre estarão ocorrendo supondo-se a peça parada e, portanto, todo movimento sendo realizado pela ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

Segundo Ferraresi (1970), os movimentos na usinagem podem ser classificados sendo ativos ou passivos. Ativos são os movimentos que geram cavacos e passivos os movimentos de deslocamentos ou posição fora da peça esses não realizam a remoção de cavaco.

Os movimentos ativos de usinagem podem ser classificados como; Movimento de trabalho, este ocorre entre a peça e a ferramenta, porém se não for combinado com o movimento de avanço produzirá retirada de material em uma única volta. Movimento de avanço responsável por dar continuidade na remoção de cavacos. Movimento efetivo de corte é a junção dos movimentos de trabalho e avanço, combinados retiram matéria prima da peça.

E os movimentos passivos podem ser classificados como; Movimento de ajuste que define a espessura do cavaco, este ocorre sempre entre ferramenta e peça a ser usinada, nos processos de furação, brochamento e sangramento não existe movimento de ajuste, pois, este fica condicionado a geometria da ferramenta. Movimento de aproximação ocorre fora da peça, sendo o deslocamento da ferramenta de uma posição afastada da peça até próximo da mesma, definido na programação como avanço rápido. E por fim o movimento de recuo que é o deslocamento da ferramenta logo após a usinagem. Os movimentos ativos e passivos são importantes para saber o tempo de fabricação de uma peça, pois a eles estão associados tempos que somados resultam no tempo total de fabricação demonstrados na Figura .

Figura 2– Direção dos movimentos de corte, avanço e efetivo no torneamento



Fonte Diniz (2006)

A velocidade de corte pode ser considerada um dos fatores mais importantes na usinagem, pois está diretamente relacionada com fatores, que envolvem desde esforços na usinagem, qualidade superficial e até custo de produção, (MACHADO et al. 2011).

Segundo Diniz *et al.* (2003), para se ter velocidade de corte, é necessário que dois movimentos ocorram de forma simultânea, sendo, a rotação da peça e o deslocamento da ferramenta. A velocidade de corte é considerada como sendo a velocidade tangencial instantânea, resultante da rotação da ferramenta em torno da peça.

Segundo Ferraresi (1970), as velocidades envolvidas no processo de remoção do cavaco, são definidas como, velocidade de corte (V_C), velocidade de avanço (V_f) e a velocidade efetiva de corte (V_e). Onde (V_C) é a velocidade imediata na aresta cortante da ferramenta, considerando a direção e sentido de corte, nos processos com movimentos de rotação.

Machado *et al.* (2011) define a (V_C) sendo a velocidade imediata na aresta cortante da ferramenta, levando-se em consideração a direção e o sentido de corte. para processos com movimentos de rotação, e pode ser calculada pela Equação (1).

$$V_C = \frac{\pi d n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

V_C = velocidade de corte [m/min]

n = número de rotações por minuto [rpm]

d = diâmetro da peça ou ferramenta na unidade de milímetros [mm]

Segundo Machado (2011) a velocidade de avanço (V_f), é considerada sendo a velocidade instantânea na aresta cortante da ferramenta, seguindo uma direção e sentido de avanço (f_n), este avanço é definido como sendo o movimento da ferramenta (mm/rev), conforme a equação (2).

$$V_f = f_n \cdot n \quad (2)$$

Sendo:

V_f = velocidade de avanço [mm/min]

f_n = avanço em milímetros por revolução [mm/rev]

n = número de rotações por minuto [rpm]

3.2 FERRAMENTAS COM COBERTURAS PVD, CVD E CERMET (PVD).

Conforme Dinis *apud* (Dreyer, 1999), os materiais *CERMET* são constituídos de uma fase cerâmica e outra metálica, são fabricados com partículas duras ligadas por aglomerante. Essas partículas são nitretos e carbonitretos de titânio, o aglomerante pode ser Ni ou Co. Tendo propriedades de alta resistência a oxidações, deposição de arestas postiças e alta resistência a deformação plástica.

Segundo Dinis *et al.*(2014), os processos de revestimentos nas ferramentas de usinagens começaram na década de 60, através do processo CVD (deposição química a vapor), nesse período era possível realizar a aplicação, somente nas ferramentas de metal duro, não podia ser aplicado em ferramentas de aço rápido, devido a esse processo ser realizado com temperaturas próximas de 1000°C, estando acima da temperatura de revenimento dos aços.

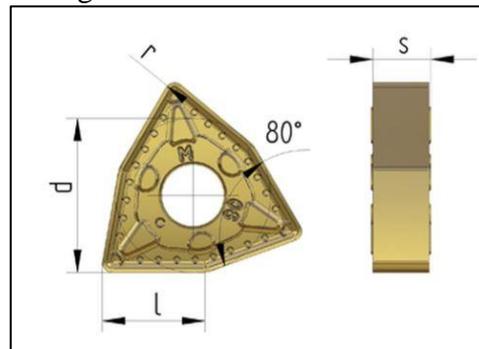
Por volta de 1980 foi desenvolvido o processo PVD (deposição física a vapor), que realiza o revestimento com temperaturas na casa de 450 a 500°C, sendo possível realizar coberturas em aços rápidos, tal processo é realizado em uma câmara de alto vácuo com a presença de um gás inerte geralmente o argônio DINIS *et al.*(2014).

Devido ao processo CVD ser realizado em altas temperaturas comprometendo a integridade de alguns aços ferramenta, novas aplicações são testadas e realizadas com temperaturas intermediárias entre CVD-PVD. Classificando-se como média temperatura (MT-CVD), com temperaturas entre 750 a 900°C. Assim como o CVD plasma assistido (PCVD ou PACVD) com temperaturas na ordem de 600 a 900°C. (Apud Prengel et al., 1998)

3.2 Ferramenta WNMG 08040x HQ

As ferramentas WNMG 08080X HQ representada na Figura 2 são indicadas para utilização em médio acabamento, possuindo opções de coberturas e raios de pontas diferentes. Nas ferramentas de *cermets* a Kyocera é conhecida sendo uma das maiores fabricantes desse seguimento, aliando a tenacidade com resistências superiores ao desgaste resultando maior vida da ferramenta e ótimos acabamentos (KYOCERA ,2019).

Figura 2 – Ferramenta WNMG

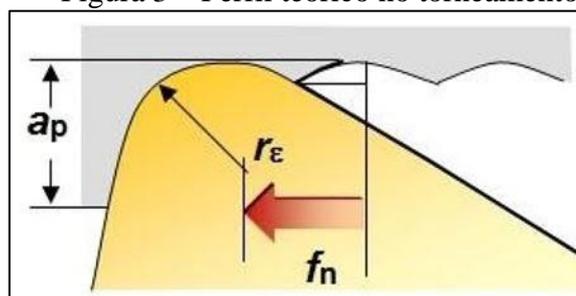


Fonte: Kyocera do Brasil (2019)

3.3 Relação das variáveis práticas com a rugosidade

Segundo Machado (2011), as condições de corte no processo de torneamento, como avanço, profundidade de corte e geometria da ferramenta, possuem ligação direta com o acabamento superficial da peça, porém o avanço é o termo que possui maior impacto devido as alturas de pico e profundidade de vale e as marcas deixadas na peça, aumentam de forma quadrática em relação ao avanço. Para condições onde o avanço (f_n) for menor que o raio da ponta da ferramenta (r_ϵ), os valores de (R_a) e (R_t) podem ser aproximados pelas equações (3) e (4), estes sendo o menor valor teórico de rugosidade obtido no torneamento, mas a rugosidade real encontrada é maior devido a outros fatores como vibração, desgaste de ferramenta, etc rugosidade teórica apresentado na Figura 3...

Figura 3 – Perfil teórico no torneamento



Fonte: Sandvik Coromant

$$R_{a\text{teórico}} = \frac{f^2}{31,2r_\epsilon} \quad (3)$$

$$R_{t\text{teórico}} = \frac{f^2}{8.r_\epsilon} \quad (4)$$

Sendo:

R_a = Rugosidade média teórica no torneamento [μm];

R_t = Rugosidade total teórica [μm];

f = Avanço [mm/rev];

r_ϵ = raio de ponta da ferramenta [mm]

3.3.1 Medição da rugosidade

A medição da rugosidade superficial pode ser avaliada utilizando-se um aparelho chamado de rugosímetro, podendo ter ou não contato, entre um apalpador e a peça, os de contato direto são os mais utilizados, e os que não possuem contato direto são de sonda óptica esses são utilizados para medições em materiais com maior fragilidade, como: folhas de papel, borrachas, pois nesses o apalpador do rugosímetro pode causar falhas na superfície analisada.

Os rugosímetros podem ser do tipo óptico, laser ou por contato, para a utilização correta de cada equipamento, existe a normativa ASME B46.1; 2002, informando as condições necessárias para aplicação correta de cada um dos equipamentos.

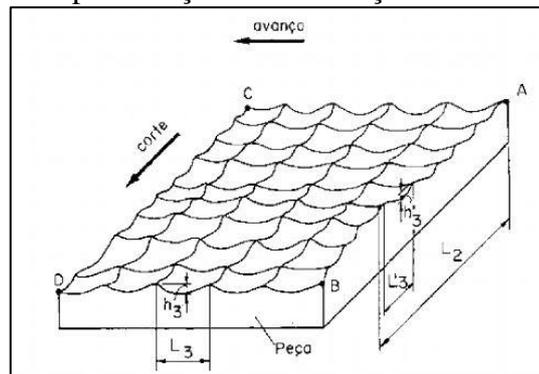
3.3.1.1 Parâmetros de rugosidade

Para a definição da rugosidade de uma peça, existem diversos parâmetros utilizados, exemplo R_a , R_z , R_q etc.. para identifica-la, podendo definir se a peça atende as exigências, de conceitos e funcionalidade, em projetos mecânicos por exemplo o desgaste a lubrificação e o atrito são altamente influenciados pela rugosidade superficial.

Para os projetos de engenharia pode-se utilizar a norma (ISO-2632), para a definição de propriedades superficiais e conseqüentemente definir os ajustes em vedações, interferências e dinâmica dos elementos de um conjunto, tendo os valores de rugosidades médias descritos para algumas operações de usinagem, através da normativa DIN 4766.

A rugosidade superficial é classificada segundo Ferraresi (1970), como sendo micro-irregularidades no sentido transversal e longitudinal da peça usinada, sendo que as transversais ocorrem na direção do avanço da ferramenta, e as marcas longitudinais se formam na direção do movimento de corte conforme Figura 4. O fator máquina e ferramentas utilizadas definem quais dessas marcas serão mais impressas na peça. Em operações de aplainamento e torneamento, a rugosidade máxima é encontrada geralmente na mesma direção do avanço, caracterizando desta forma a rugosidade transversal da peça.

Figura 4 – Representação das ondulações e micro-irregularidades



Fonte: Dino Ferraresi (1970)

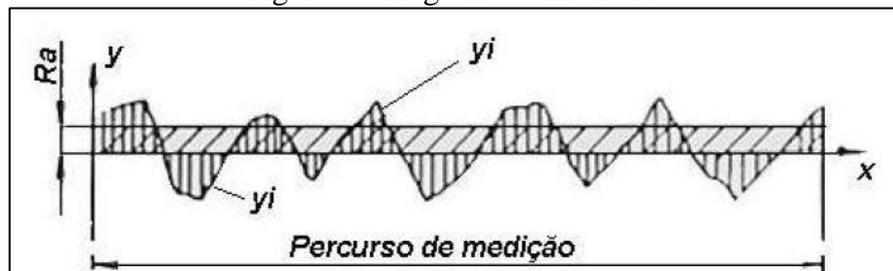
Conforme Novaski (1994), as marcas ou sulcos na superfície de uma peça usinada, descrevem o perfil da ferramenta que atuou sobre a mesma, e classifica essas marcas ou texturas como sendo, textura primária ou rugosidade, ficando essas superpostas ao perfil de ondulação. Esses sulcos ocorrem quando uma máquina e ferramenta estiver usinando determinado material com uma ferramenta do tipo monocortante, que possui um único gume de corte em contato com a peça.

De acordo com Novaski (1994), as ondulações ou texturas secundárias ficam a caráter do conjunto das irregularidades que se repetem, possuindo um comprimento de onda maior que a amplitude gerada pelas imprecisões nos equipamentos. Essas ondulações podem ser características de falhas, na fixação da máquina ou ferramenta, ocasionando vibrações no processo.

A eficiência das ferramentas de corte com a qualidade superficial de uma peça realizada no processo de usinagem, são altamente dependentes das condições de corte, sendo estas; a velocidade de corte, taxa de avanço, profundidade de corte e raio da ponta da ferramenta, que influenciam significativamente na rugosidade da superfície (DAVIM, 2008).

A associação Brasileira de normas técnicas ABNT, define na normativa NBR ISO 4287 (2002), que a rugosidade média (R_a), é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas em relação à linha média no comprimento de amostragem. Sendo este parâmetro um dos mais utilizados devido sua facilidade na medição apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Rugosidade média R_a



Fonte: Mitutoyo (2019)

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (9)$$

Sendo:

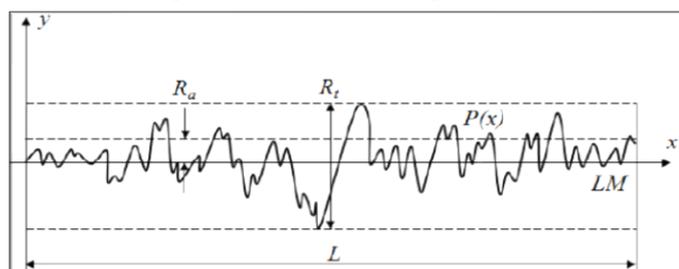
R_a = Rugosidade média;

y_n = altura dos picos e vales fora da linha média;

n = comprimento de amostragem.

Comparativo da medição para os dados R_a e R_t , sendo que para rugosidade total é avaliado toda amplitude dentro de um comprimento de amostragem, e na rugosidade média, avalia-se a diferença de altura entre a linha média e os máximos de picos e vales, conforme apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Perfil de rugosidade R_a e R_t

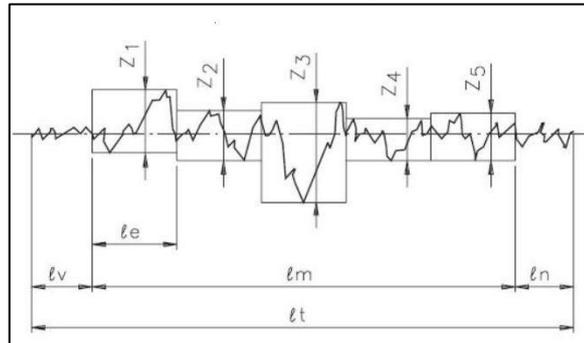


Fonte: Mello et al, (2012)

Segundo Novaski (1994), a rugosidade média (R_z) é a média aritmética dos cinco valores da rugosidade parcial, a rugosidade parcial é definida como a soma dos valores

absolutos dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média contemplando os valores de máximo pico e mínimo vale conforme Figura 7.

Figura 7 – Perfil de rugosidade R_z



Fonte: Novaski (1994)

$$R_z = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5}{5} \quad (8)$$

Onde:

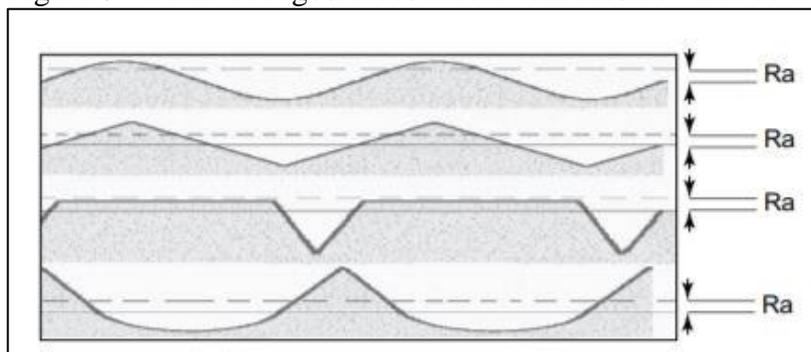
R_z = Rugosidade média aritmética para cinco valores;

Z_i = Representa cada valor.

Segundo Machado *et al.* (2011), para avaliar o perfil de rugosidades, devem ser considerados alguns critérios, sendo esses, comprimento de amostragem definido como *Cut-off*. Podendo haver um ou mais comprimentos de amostragem para determinado número de amostragem. A normativa ABNT NBR ISO 4287 (2002), define que o comprimento de amostragem é considerado na direção perpendicular ao sentido da usinagem para identificar as irregularidades na superfície.

Conforme Machado *et al.* (2011), somente a avaliação de rugosidade R_a não é suficiente para definir o perfil geométrico do acabamento de uma peça, desta maneira sempre que for necessário conhecer a altura máxima da rugosidade devem ser empregados os parâmetros R_t ou R_z , na Figura 8, é possível identificar diferentes perfis de rugosidades. com o mesmo valor de R_a , demonstrando que só o análise de rugosidade não é suficiente para definir o perfil geométrico da mesma.

Figura 8 – Perfil de rugosidades média com mesmo valor de R_a



Fonte: Sandro Cardoso; Wisley Falco (2007)

Machado *et al.* (2011) descreve que, uma peça realizada pelo processo de usinagem, demonstra na superfície de acabamento, as influências que ocorreram no processo, podendo ser: deformações plásticas, rupturas, recuperações elásticas, geração de calor, vibrações, tensões residuais ou reações químicas, deixando assim o acabamento superficial da peça.

3.4 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Conforme Vieira (2006), análise de variância é uma técnica estatística que permite avaliar afirmações sobre as médias de uma população, verificando se existem diferenças significativas entre as médias e se os fatores controláveis influenciam em alguma variável dependente. Para utilizar a anova algumas pressuposições da análise precisam ser satisfeitas:

1. A presença de dados discrepantes;
2. Se os erros são independentes;
3. Se a variância é constante;
4. Se a distribuição do erro é normal.

Conforme Vieira (2006), não é fácil entender todas as pressuposições sem realizar outras análises sendo: análise dos resíduos, análise dos dados discrepantes, independência, variância constante. Para análise dos resíduos, não tendo o conhecimento das médias verdadeiras μ_i dos tratamentos, nem os erros ξ_{ij} , realiza-se um experimento para obter as estimativas dessas médias.

Segundo Vieira (2006), análise de variância pode ser descrita como sendo uma extensão do teste t student, que compara somente duas médias. Já a análise de variância permite comparar qualquer número de médias, e em casos particulares por exemplo, duas médias, tanto se pode aplicar um teste t student ou análise de variância que se obterá o mesmo resultado.

Conforme Vieira (2006), não é fácil entender todas as pressuposições sem realizar outras análises sendo: análise dos resíduos, análise dos dados discrepantes, independência, variância constante. Para análise dos resíduos, não tendo o conhecimento das médias verdadeiras μ_i dos tratamentos, nem os erros ξ_{ij} , realiza-se um experimento para obter as estimativas dessas médias.

Segundo Vieira (2006), o fato das médias e os tratamentos serem diferentes, podem ser descritos por casualidades ou os dados serem diferentes. E até qual limite as médias dos tratamentos podem ser tomadas como evidência, de que as médias são mesmo diferentes, para identificar esse limite é realizado uma análise de variância. Além disso, Vieira (2006), descreve que, a soma dos resultados das repetições (r), de um mesmo tratamento, constitui o total desse tratamento, e o total geral será dado pela soma dos totais de tratamentos, serão k tratamentos, tendo o experimento $n = kr$ unidades, a Tabela 2 informa um experimento que foi realizado com possíveis dados ao acaso, para melhorar o entendimento da maneira que os dados serão tratados posteriormente.

Tabela 2 – Dados experimentais ao acaso

| | Tratamento | | | | | Total |
|----------------------|------------|-------|-------|------|-------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | k | |
| . | . | . | . | . | . | |
| . | . | . | . | . | . | |
| . | . | . | . | . | . | |
| Total | T_1 | T_2 | T_3 | ... | T_k | $\sum y$ |
| Numero de repetições | r | r | r | | r | $n = kr$ |

Fonte: Adaptado Sonia Vieira (2006).

Tendo como graus de liberdade:

- tratamento ($k - 1$)
- do total ($n - 1$), sendo $n = kr$
- do resíduo ($n - 1$) - ($k - 1$) = $n - kn$

Para realizar a análise de variância de um experimento com os dados obtidos inteiramente ao acaso, é necessário calcular quantidades desses dados, suas médias, e por fim um modelo estatístico que descreva as respostas das unidades dos tratamentos. Nesse modelo será calculada média verdadeira de todas as respostas possíveis (μ_i) acrescida de uma quantidade de erros ξ_{ij} .

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

Sendo:

Y_{ij} = resposta dos dados;

μ_i = média dos tratamentos;

ε_{ij} = erro.

De acordo com Vieira (2006), para que seja possível a realização da análise de variância em experimentos inteiramente ao acaso, é necessário realizar os cálculos e conhecer os seguintes valores, os graus de liberdade, o valor da constante de correção, representada pela letra (C), a soma dos quadrados total, a soma dos quadrados de tratamentos, a soma dos quadrados de resíduos, o quadrado médio de tratamento, o quadrado médio de resíduo e o valor de significância F. Sendo F à distribuição de *Fisher-Snedecor* tabela no anexo 1, com K-1 e n-K graus de liberdade, onde k é o número de grupos e n o número de observações. Nessa distribuição cada grau de liberdade depende de dois parâmetros, sendo o grau de liberdade do numerador e do denominador.

A análise dos resíduos tem a finalidade de avaliar a qualidade dos resultados, avaliando se os resultados são reais, ou se não passam de mera coincidência, além disso servem para identificar discrepâncias ou erros, tais como inversão de valores, digitação incorreta, inadequação do resultado ao experimento etc... Segundo Montgomery (2005) para que um modelo seja formulado adequadamente, os resíduos não devem ser correlacionados independentes e devem ser normalmente distribuídos.

Para realizar a análise de variância são necessários manipulações algébricas com os dados coletados. Os equacionamentos que realizam esse tratamento estão demonstrados nas equações de (6) até (12).

$$C = \frac{(\sum y)^2}{n} \quad (6)$$

$$SQT = \sum y^2 - C \quad (7)$$

$$SQTr = \frac{\sum T^2}{r} - C \quad (8)$$

$$SQR = QT - SQTr \quad (9)$$

$$QMTr = \frac{SQTr}{k - 1} \quad (10)$$

$$QMR = \frac{SQR}{n - K} \quad (11)$$

$$F = \frac{QMTr}{QMR} \quad (12)$$

Onde:

C = constante de correção;

n = número de repetições;

$\sum y^2$ = somatório geral elevado ao quadrado;

$QMTr$ = quadrado médio dos tratamentos;

K = tratamento;

QMR = quadrado médio dos resíduos.

1.5 ESTADO DA ARTE

Tendo como parâmetros de muitos processos de usinagem, a rugosidade cada vez mais possui contribuição nos dados de entrada das operações e maquinários, que executam determinada operação, e as ferramentas estão demonstrando excelentes resultados em suas aplicações para diversos tipos de materiais, diversos métodos são utilizados para avaliar esses dados. Abaixo serão apresentadas algumas pesquisas realizadas na área de torneamento, acabamento superficial, utilizando as ferramentas *wiper* e convencional e a aplicação da análise de variância (ANOVA), para identificar as influências nos processos.

Torneamento de aços endurecidos é adequado para peças com dureza superior a 45 HRC, o estudo realizado por DAddona e Raykar (2015), avaliou a aplicação de duas ferramentas: uma modelo alisadora *wiper* e outra convencional, realizando a variação no raio de ponta. Para os testes foram usinados corpos de prova com dureza de 55 HRC, comprimento de 50mm e diâmetro de 40mm, para a medição da rugosidade das peças utilizaram um rugosímetro mitutoyo SJ-201, avaliando em três pontos de cada amostra com comprimento de amostragem de 0,8mm. Evidenciaram no estudo que a utilização das ferramentas *wiper* realizaram acabamentos superficiais de alta qualidade, apresentando resultados equivalentes aos processos de retificação em termos de precisão e qualidade da superfície usinada. Com aplicação da ANOVA com um grau de significância inferior a 0,05 (ou 95% de confiança), os parâmetros avaliados apresentaram significâncias consideráveis na superfície.

No trabalho apresentado por Ahmed Belbah, et al (2013), avaliaram a influência na rugosidade superficial causada pela vibração da ferramenta no processo de torneamento de aços endurecidos. Para analisar os dados utilizaram dois métodos o (RSM) que consiste na metodologia de superfície de resposta, tendo como parâmetros de entrada a velocidade de corte, taxa de alimentação, profundidade de corte e vibração da ferramenta na direção de força de corte radial e principal. Utilizaram a análise de variância (ANOVA) para avaliar os efeitos combinados dos parâmetros de corte com a vibração final da peça. Descrevendo que a metodologia de resposta (RSM), combinada com planejamento fatorial do experimento, conseguem descrever a rugosidade superficial da peça. A análise de variância (ANOVA), identificaram que os fatores que mais influenciaram na evolução da rugosidade superficial avaliada (R_a e R_t), foram o avanço (f_n) e a velocidade de corte, destacando que a profundidade de corte (a_p), não apresentaram valores significantes para a rugosidade da peça.

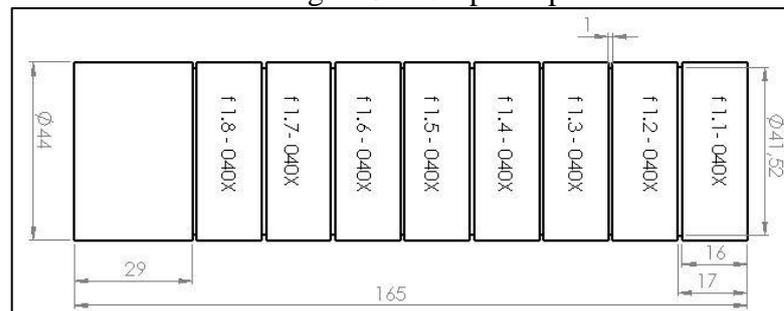
2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a confecção deste trabalho, foram usinadas 24 peças de aço SAE-1045, com diâmetro final de 44mm e comprimento de 165mm, com oito espaçamentos de 16mm apresentado na figura (10) e (13). Essa usinagem foi realizada em duas etapas, na primeira foi utilizado Torno mecânico CLEVER CO232, do laboratório de usinagens mecânicas da UCS-CARVI, para o pré-desbaste deixando as peças com \varnothing 47mm e realizado o processo de furação de centro, e na segunda etapa foi utilizado um torno CNC ROMI CENTUR 30D figura (11), na empresa TECH FOR BRASIL, realizando um passe de desbaste para \varnothing de 45mm, corte de canais e o passe de acabamento, para programação do torno CNC foi utilizado o Software

Mastercam X8. Na usinagem final das amostras foi utilizado o torno CNC, para garantir a repetibilidade dos processos, com as seguintes variáveis: duas profundidades de corte (0,5 e 1,00 mm); duas velocidades de corte (150 e 250 m/min); três coberturas de ferramentas (CVD, PVD e CERMET); dois raios de ponta (0,4 e 0,8 mm) e quatro avanços (0,12 , 0,14, 0,16 e 0,20 mm/rot).

Na Figura 9, está o desenho técnico da peça, contendo todas as dimensões necessárias para sua fabricação

Figura 9 – Corpo de prova



Fonte: Autor (2019)

Figura 10 apresenta o torno CNC utilizado para fabricação das 24 peças utilizadas nesse trabalho.

Figura 10 – Torno CNC Romi Centur 30D



Fonte: Autor (2019)

A Figura 11 demonstra como foi realizada a fixação da peça no torno, fixada com placa de três castanhas e calçada com o contra ponto, afim de evitar possíveis vibrações na operação. É possível verificar o suporte com a ferramenta que foi utilizada na usinagem.

Figura 11 – Fixação da peça no torno



Fonte: Autor (2019)

Figura 12 apresenta uma das peças já usinada, conforme os dados passados ao operador, é possível analisar que o distanciamento para análises ficou bem demarcado, esse serve para não ocorrer medições em partes fora dos parâmetros desejáveis.

Figura 12 – Corpo de prova usinado



Fonte: Autor (2019)

Os insertos utilizados foram de metal duro com dois tipos de cobertura, sendo essas realizadas através do processo de revestimento (CVD, PVD) e CERMET(PVD), processos explicados nos itens 3.2 e 3.3, todos com a mesma geometria WNMG 080408 HQ e WNMG 080408 HQ, sendo que o prefixo HQ representa o tipo de quebra cavaco da ferramenta, e a Figura 13 apresenta o desenho para esse tipo de quebra cavaco.

Figura 13 – Insertos utilizados



Fonte: Autor (2019)

Para cada tipo de inserto existe um suporte indicado pelo fabricante. Na Figura 14 está o suporte indicado pelo fabricante desses insertos, que possui a seguinte descrição, MWLNR-2525-M08. Para realização das usinagens foi adquirido um suporte novo, para minimizar quaisquer influências que pudessem aparecer devido ao estado de uso do mesmo.

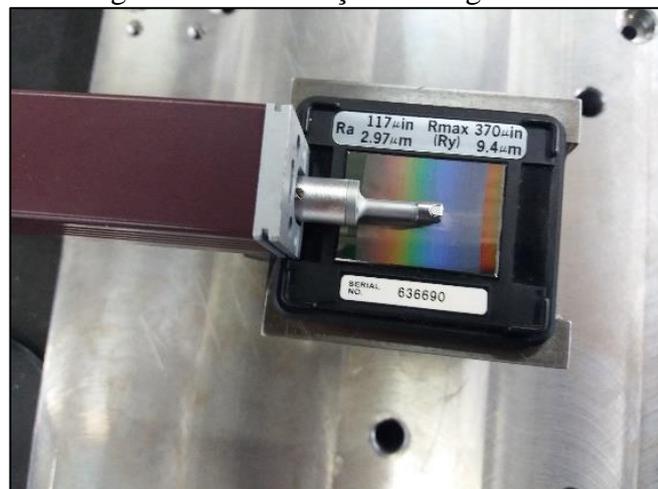
Figura 14 – Suporte dos insertos



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Para medição da rugosidade das peças, foi utilizado equipamento eletrônico de superfície plana rugosímetro, marca Mitutoyo, modelo SJ-201 o qual é calibrado com uma amostra padrão de $2,97 \mu\text{m}$ Figura 15 tendo incerteza de $0,01 \mu\text{m}$ em R_a , e $(0,02 \mu\text{m})$ para R_z . Para os valores de rugosidades R_a e R_z , foi utilizado *Cut-off* de $0,8\text{mm}$, este é definido de acordo com a norma JIS B0601-1994, este valor avalia a distância dos sulcos ou marcas que são impressas na peça pela ferramenta no processo de usinagem, e o comprimento de avaliação dos dados foi de 5 vezes conforme indicação da norma JIS B0601-1994.

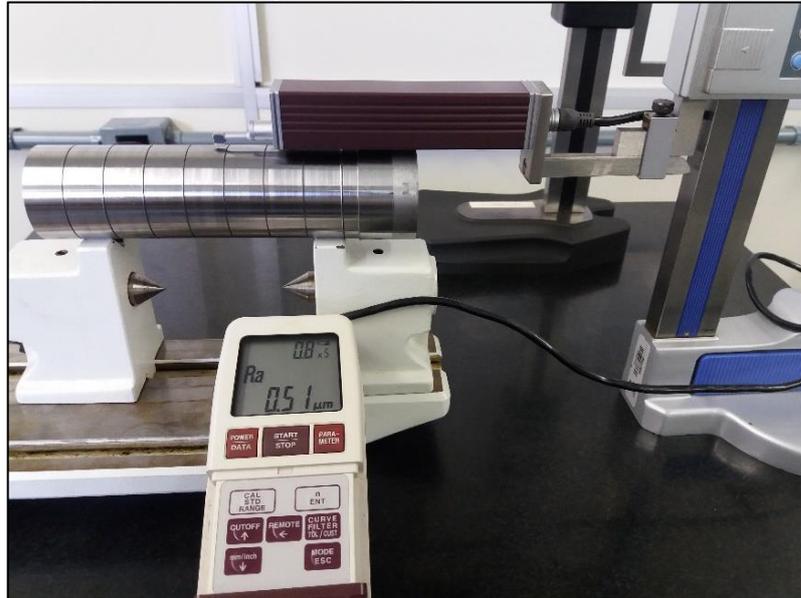
Figura 15 – Calibração do Rugosímetro



Fonte: Autor (2019)

A Figura 16 apresenta a maneira na qual o rugosímetro e as peças foram fixadas para realizar a análise das rugosidades R_a e R_z . Para garantir que todas as medições fossem realizadas no centro da peça, utilizou-se um bloco com apoio tipo V.

Figura 16 – Fixação do Rugosímetro e Corpo de Prova



Fonte: Autor (2019)

A Tabela 3 apresenta todos os valores de rugosidade R_a que foram coletadas das amostras usinadas, e os fatores controláveis utilizados para a análise de variância sendo:

Os fatores controláveis e seus respectivos níveis:

- X1 = Profundidade de corte (0,5 e 1,00 mm);
- X2 = Velocidade de corte (150 e 250 m/min);
- X3 = Cobertura da ferramenta (PVD, CVD e CERMET);
- X4 = Raio de ponta da ferramenta (0,4 e 0,8 mm);
- X5 = Avanço (0,12, 0,16, 0,18 e 0,20 mm/rev).

Tabela 3 – Fatores controláveis e dados de rugosidade R_a

| AVANÇO (X5) | ap(X1) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----------------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|--------------------|-----------------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|
| | 0,5 | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | |
| | VELOCIDADE (X2) | | | | | | | | | | | | VELOCIDADE (X2) | | | | | | | | | | | |
| | 150 | | | | | | 250 | | | | | | 150 | | | | | | 250 | | | | | |
| | COBERTURA (X3) | | | | | | | | | | | | COBERTURA (X3) | | | | | | | | | | | |
| | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD |
| RAIO DE PONTA (X4) | | | | | | | | | | | | RAIO DE PONTA (X4) | | | | | | | | | | | | |
| 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | |
| 0,120 | 1,39 | 0,71 | 1,30 | 0,75 | 1,03 | 0,84 | 1,41 | 0,71 | 1,29 | 0,77 | 1,12 | 0,92 | 1,49 | 0,84 | 1,36 | 0,83 | 1,13 | 0,89 | 1,49 | 0,77 | 1,35 | 0,87 | 1,21 | 0,94 |
| | 1,40 | 0,73 | 1,30 | 0,71 | 1,04 | 0,84 | 1,40 | 0,79 | 1,30 | 0,74 | 1,10 | 0,91 | 1,45 | 0,70 | 1,38 | 0,87 | 1,12 | 0,92 | 1,49 | 0,82 | 1,33 | 0,88 | 1,21 | 0,89 |
| | 1,39 | 0,73 | 1,30 | 0,73 | 1,03 | 0,83 | 1,40 | 0,76 | 1,31 | 0,77 | 1,12 | 0,94 | 1,47 | 0,78 | 1,38 | 0,85 | 1,11 | 0,88 | 1,51 | 0,84 | 1,35 | 0,87 | 1,22 | 0,93 |
| | 1,39 | 0,73 | 1,30 | 0,73 | 0,99 | 0,87 | 1,39 | 0,74 | 1,30 | 0,74 | 1,04 | 0,89 | 1,48 | 0,81 | 1,37 | 0,82 | 1,16 | 0,83 | 1,48 | 0,77 | 1,33 | 0,87 | 1,19 | 0,85 |
| | 1,40 | 0,74 | 1,29 | 0,73 | 0,99 | 0,87 | 1,39 | 0,77 | 1,30 | 0,78 | 1,05 | 0,88 | 1,48 | 0,84 | 1,39 | 0,79 | 1,19 | 0,89 | 1,49 | 0,80 | 1,35 | 0,85 | 1,18 | 0,85 |
| | 1,39 | 0,70 | 1,29 | 0,73 | 0,93 | 0,85 | 1,42 | 0,74 | 1,29 | 0,73 | 1,02 | 0,88 | 1,48 | 0,88 | 1,37 | 0,80 | 1,17 | 0,83 | 1,48 | 0,74 | 1,38 | 0,84 | 1,16 | 0,84 |
| 0,140 | 1,78 | 0,89 | 1,72 | 0,96 | 1,29 | 1,19 | 1,74 | 1,01 | 1,61 | 0,92 | 1,37 | 1,20 | 1,86 | 1,09 | 1,66 | 1,11 | 1,49 | 1,20 | 1,90 | 0,94 | 1,70 | 1,07 | 1,40 | 1,27 |
| | 1,77 | 0,89 | 1,64 | 0,97 | 1,32 | 1,20 | 1,73 | 1,03 | 1,64 | 0,92 | 1,34 | 1,21 | 1,84 | 0,99 | 1,70 | 1,07 | 1,49 | 1,20 | 1,88 | 0,96 | 1,70 | 1,09 | 1,39 | 1,23 |
| | 1,77 | 0,92 | 1,65 | 0,96 | 1,31 | 1,21 | 1,76 | 0,97 | 1,63 | 0,92 | 1,37 | 1,24 | 1,86 | 1,01 | 1,70 | 1,04 | 1,51 | 1,21 | 1,88 | 0,97 | 1,71 | 1,07 | 1,42 | 1,23 |
| | 1,78 | 0,90 | 1,64 | 0,96 | 1,22 | 1,22 | 1,76 | 1,01 | 1,62 | 0,92 | 1,29 | 1,28 | 1,88 | 1,02 | 1,66 | 1,06 | 1,39 | 1,14 | 1,87 | 0,99 | 1,70 | 1,07 | 1,49 | 1,18 |
| | 1,80 | 0,93 | 1,64 | 0,95 | 1,24 | 1,20 | 1,77 | 1,03 | 1,61 | 0,90 | 1,29 | 1,28 | 1,84 | 1,02 | 1,70 | 1,07 | 1,42 | 1,16 | 1,86 | 0,95 | 1,69 | 1,06 | 1,50 | 1,17 |
| | 1,78 | 0,93 | 1,64 | 0,96 | 1,22 | 1,22 | 1,76 | 1,03 | 1,59 | 0,93 | 1,30 | 1,28 | 1,85 | 1,04 | 1,72 | 1,06 | 1,42 | 1,17 | 1,88 | 0,97 | 1,68 | 1,08 | 1,49 | 1,19 |
| 0,160 | 2,14 | 1,00 | 1,97 | 1,19 | 1,40 | 1,63 | 2,09 | 1,11 | 1,92 | 1,16 | 1,47 | 1,61 | 2,20 | 1,17 | 2,03 | 1,33 | 1,77 | 1,49 | 2,23 | 1,15 | 2,01 | 1,33 | 1,72 | 1,54 |
| | 2,12 | 0,95 | 1,99 | 1,18 | 1,38 | 1,62 | 2,06 | 1,09 | 1,93 | 1,19 | 1,47 | 1,60 | 2,25 | 1,15 | 2,04 | 1,34 | 1,70 | 1,49 | 2,23 | 1,12 | 2,00 | 1,33 | 1,72 | 1,53 |
| | 2,14 | 1,05 | 1,97 | 1,19 | 1,40 | 1,62 | 2,07 | 1,15 | 1,95 | 1,17 | 1,45 | 1,60 | 2,24 | 1,12 | 2,05 | 1,34 | 1,76 | 1,50 | 2,25 | 1,10 | 2,00 | 1,33 | 1,73 | 1,54 |
| | 2,14 | 1,04 | 1,99 | 1,19 | 1,33 | 1,54 | 2,06 | 1,13 | 1,94 | 1,18 | 1,36 | 1,54 | 2,23 | 1,14 | 2,04 | 1,32 | 1,74 | 1,47 | 2,25 | 1,13 | 2,01 | 1,32 | 1,83 | 1,48 |
| | 2,12 | 1,02 | 1,97 | 1,19 | 1,33 | 1,54 | 2,10 | 1,08 | 1,92 | 1,18 | 1,38 | 1,55 | 2,21 | 1,15 | 2,05 | 1,34 | 1,75 | 1,46 | 2,23 | 1,09 | 2,03 | 1,33 | 1,83 | 1,48 |
| | 2,13 | 1,05 | 1,97 | 1,21 | 1,33 | 1,54 | 2,09 | 1,10 | 1,94 | 1,17 | 1,35 | 1,55 | 2,21 | 1,16 | 2,03 | 1,33 | 1,73 | 1,44 | 2,24 | 1,10 | 2,02 | 1,32 | 1,91 | 1,47 |
| 0,200 | 2,71 | 1,62 | 2,61 | 1,76 | 1,86 | 2,10 | 2,70 | 1,62 | 2,57 | 1,90 | 1,95 | 2,03 | 2,20 | 1,81 | 2,65 | 1,91 | 2,18 | 2,01 | 2,87 | 1,64 | 2,63 | 1,88 | 2,16 | 2,00 |
| | 2,74 | 1,63 | 2,62 | 1,75 | 1,85 | 2,08 | 2,72 | 1,65 | 2,58 | 1,88 | 1,96 | 2,09 | 2,25 | 1,83 | 2,65 | 1,88 | 2,14 | 1,99 | 2,87 | 1,69 | 2,63 | 1,89 | 2,11 | 1,98 |
| | 2,73 | 1,63 | 2,64 | 1,77 | 1,82 | 2,08 | 2,71 | 1,61 | 2,58 | 1,87 | 1,94 | 2,05 | 2,24 | 1,85 | 2,64 | 1,90 | 2,13 | 2,00 | 2,85 | 1,69 | 2,64 | 1,86 | 2,11 | 1,99 |
| | 2,74 | 1,62 | 2,58 | 1,76 | 1,84 | 2,04 | 2,69 | 1,61 | 2,57 | 1,88 | 1,76 | 2,02 | 2,23 | 1,82 | 2,66 | 1,88 | 2,20 | 1,89 | 2,87 | 1,68 | 2,65 | 1,87 | 2,18 | 1,98 |
| | 2,75 | 1,60 | 2,61 | 1,74 | 1,83 | 2,04 | 2,70 | 1,62 | 2,51 | 1,85 | 1,76 | 2,03 | 2,21 | 1,76 | 2,63 | 1,89 | 2,10 | 1,93 | 2,88 | 1,69 | 2,65 | 1,86 | 2,14 | 2,00 |
| | 2,77 | 1,65 | 2,61 | 1,77 | 1,85 | 2,04 | 2,69 | 1,60 | 2,54 | 1,84 | 1,76 | 2,00 | 2,21 | 1,78 | 2,63 | 1,90 | 2,19 | 1,89 | 2,87 | 1,65 | 2,65 | 1,85 | 2,15 | 1,98 |

Fonte: Autor (2019)

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos, tendo-se realizado diversas comparações entre os fatores controláveis, para poder analisar quais foram os fatores mais significativos nos resultados de rugosidades R_a e R_z .

Todos os resultados são baseados em um teste de hipótese ou valor de probabilidade menor que 5% para considerar-se médias significativamente diferentes, ou seja, uma confiabilidade de 95%, utilizando-se para análise a ferramenta *anovan* do *software Matlab*.

Analisando os valores gerados pelo método de variância para os fatores controláveis em relação a rugosidade R_a , e avaliando os fatores (X1, X2, X3, X4, X5) isolados é possível concluir que: para todos os testes, o raio de ponta da ferramenta (X4) foi o fator que mais influenciou no acabamento das peças, seguido do avanço da ferramenta (X5), posteriormente a profundidade de corte (X1), do tipo de cobertura (X3) e da velocidade de corte (X2). E analisando algumas combinações entre os fatores controláveis de maneira ordenada de maior para menor significância nos resultados R_a , conclui-se que alterando simultaneamente (X3,X4), possui maior significância e (X1,X2) possuem a menor contribuição entre esses fatores escolhidos e demonstrados na figura (19).

A seguir será demonstrado as imagens com os resultados obtidos nas combinações realizadas e para dados isolados, primeiramente será apresentado todos com relação a rugosidade R_a , e após todos R_z .

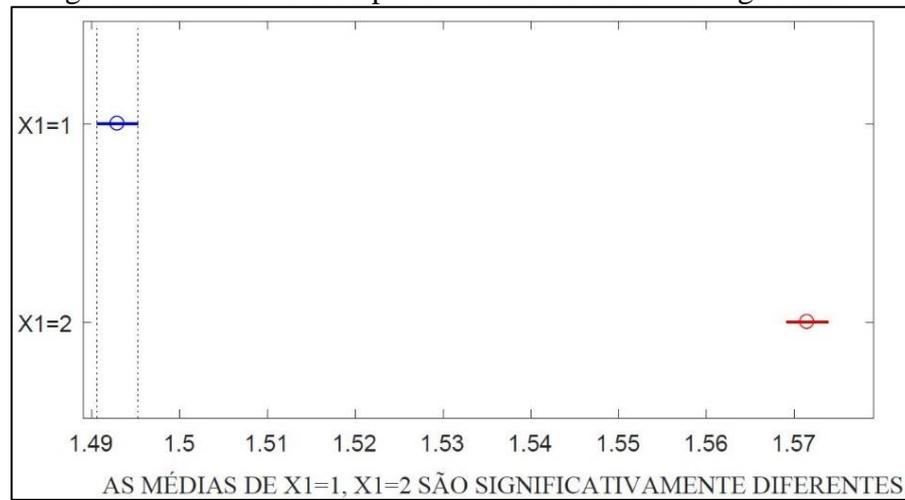
Na Figura 17 está representada a análise de variância para rugosidade R_a realizado com a função *anovan software Matlab*, assim como os valores para todas as interações escolhidas nesse trabalho, explicitando os fatores controláveis, a soma dos quadrados, os graus de liberdade, a média dos quadrados, o fator F e o teste de hipótese de significância P. Verifica-se que o fator controlável de raio de ponta apresenta a maior significância no teste, isso pode ser justificado de acordo com a equação (3) da rugosidade teórica, que analisa avanço ao quadrado sendo esses valores nas casas decimais, dividido por uma razão de oito vezes o raio de ponta, com isso quanto maior for o valor do raio menor será a rugosidade teórica.

Figura 17– Análise da ANOVA para Ra

| ANOVA PARA Ra | | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------|--------|
| Fatores Controláveis | Soma dos Quadrados | Graus de Liberdade | Média dos Quadrados | F | Prob>F |
| X1 | 0.888 | 1 | 0.8875 | 1055.13 | 0 |
| X2 | 0.051 | 1 | 0.0512 | 60.86 | 0 |
| X3 | 1.473 | 2 | 0.7365 | 875.64 | 0 |
| X4 | 44.184 | 1 | 44.1837 | 52528.01 | 0 |
| X5 | 90.724 | 3 | 30.2413 | 35952.47 | 0 |
| X1*X2 | 0.005 | 1 | 0.005 | 5.89 | 0.0156 |
| X1*X3 | 0.051 | 2 | 0.0257 | 30.53 | 0 |
| X1*X4 | 0.168 | 1 | 0.1678 | 199.44 | 0 |
| X1*X5 | 0.087 | 3 | 0.0292 | 34.66 | 0 |
| X2*X3 | 0.045 | 2 | 0.0227 | 26.94 | 0 |
| X2*X4 | 0.013 | 1 | 0.0129 | 15.38 | 0.0001 |
| X2*X5 | 0.032 | 3 | 0.0106 | 12.56 | 0 |
| X3*X4 | 15.559 | 2 | 7.7797 | 9248.87 | 0 |
| X3*X5 | 0.558 | 6 | 0.0931 | 110.65 | 0 |
| X4*X5 | 0.35 | 3 | 0.1167 | 138.78 | 0 |
| X1*X2*X3 | 0.018 | 2 | 0.0089 | 10.56 | 0 |
| X1*X2*X4 | 0.099 | 1 | 0.099 | 117.65 | 0 |
| X1*X2*X5 | 0.065 | 3 | 0.0218 | 25.87 | 0 |
| X1*X3*X4 | 0.893 | 2 | 0.4463 | 530.61 | 0 |
| X1*X3*X5 | 0.092 | 6 | 0.0153 | 18.15 | 0 |
| X1*X4*X5 | 0.084 | 3 | 0.0281 | 33.36 | 0 |
| X2*X3*X4 | 0.076 | 2 | 0.0379 | 45.03 | 0 |
| X2*X3*X5 | 0.098 | 6 | 0.0163 | 19.38 | 0 |
| X2*X4*X5 | 0.078 | 3 | 0.0259 | 30.75 | 0 |
| X3*X4*X5 | 1.491 | 6 | 0.2485 | 295.47 | 0 |
| X1*X2*X3*X4 | 0.216 | 2 | 0.1082 | 128.62 | 0 |
| X1*X2*X3*X5 | 0.179 | 6 | 0.0298 | 35.48 | 0 |
| X1*X2*X4*X5 | 0.12 | 3 | 0.0401 | 47.64 | 0 |
| X1*X3*X4*X5 | 0.419 | 6 | 0.0699 | 83.09 | 0 |
| X2*X3*X4*X5 | 0.292 | 6 | 0.0486 | 57.8 | 0 |
| X1*X2*X3*X4*X5 | 0.162 | 6 | 0.0271 | 32.18 | 0 |
| Erro | 0.404 | 480 | 0.0008 | | |
| Total | 158.974 | 575 | | | |

Fonte: Autor (2019)

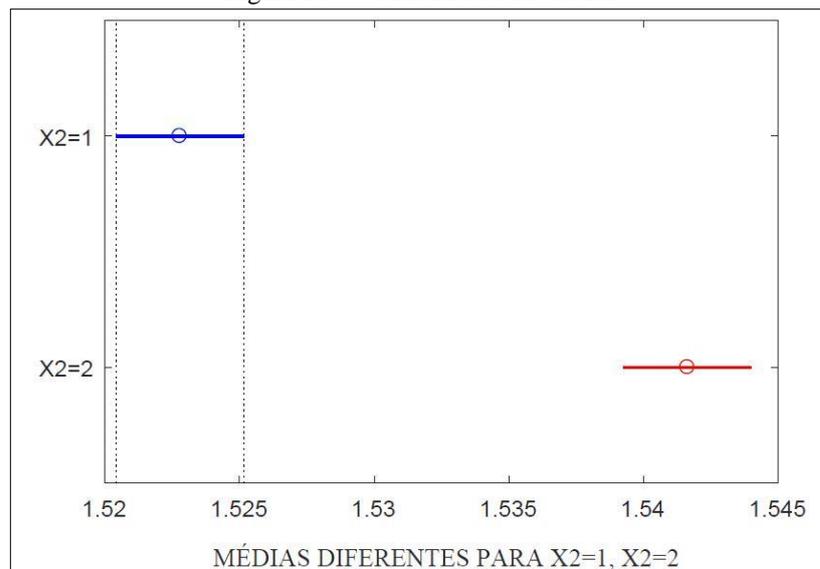
Na, foi analisado a profundidade de corte, com todas interações possíveis dos fatores controláveis, resultando que para profundidade de corte menor, o acabamento é melhor, comprovando-se que para desbaste pode ser usado maiores profundidades, mas para o processo de acabamento profundidades de corte menores devem ser utilizadas, conforme descrito no item 2.1.3.

Figura 18 – Influência da profundidade de corte na Rugosidade R_a 

Fonte: Autor (2019)

A Figura 19, descreve a influência da velocidade de corte para o acabamento R_a , destacado na cor azul a menor velocidade, tendo o melhor acabamento, e na cor vermelha a maior velocidade, resultando no pior acabamento. Isso poderia ser justificado por alguns ruídos estarem presentes no experimento, tais como, pela maior possibilidade de vibração quando são utilizadas maiores velocidades de corte, ou por ter sido observado a geração de cavacos considerados inadequados, ou seja formação de cavaco no formato de fita, o que pode ter interferido na qualidade superficial. Esses cavacos podem ser observados na figura (12).

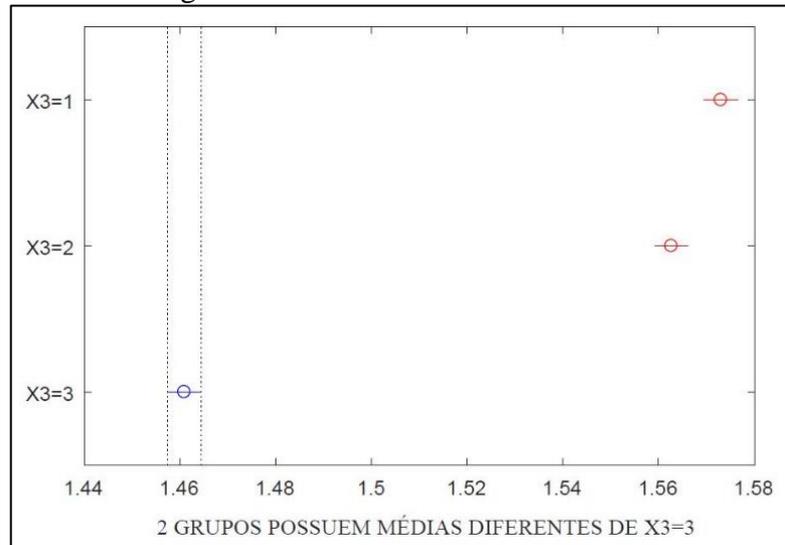
Figura 19 – Velocidade de Corte



Fonte: Autor (2019)

Na, é possível identificar que existe variação da rugosidade de acordo com a cobertura da ferramenta, onde $X3=1$, $X3=2$ e $X3=3$, são respectivamente PVD, CERMET e CVD, sendo que a ferramenta com cobertura CVD atingiu melhores resultados.

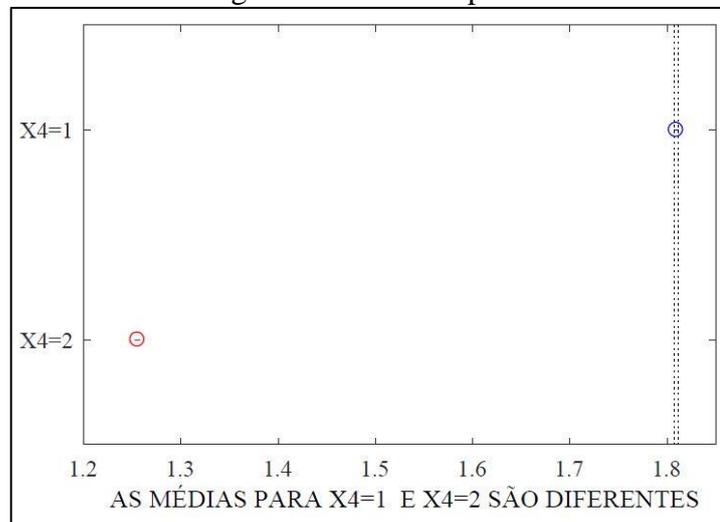
Figura 20 – Cobertura das ferramentas



Fonte: Autor (2019)

Na Figura 21 é possível analisar que o raio de ponta da ferramenta possui contribuição para a rugosidade da peça, afirmando rugosidade teórica equação (3), quanto menor o raio de ponta da ferramenta pior a qualidade do acabamento.

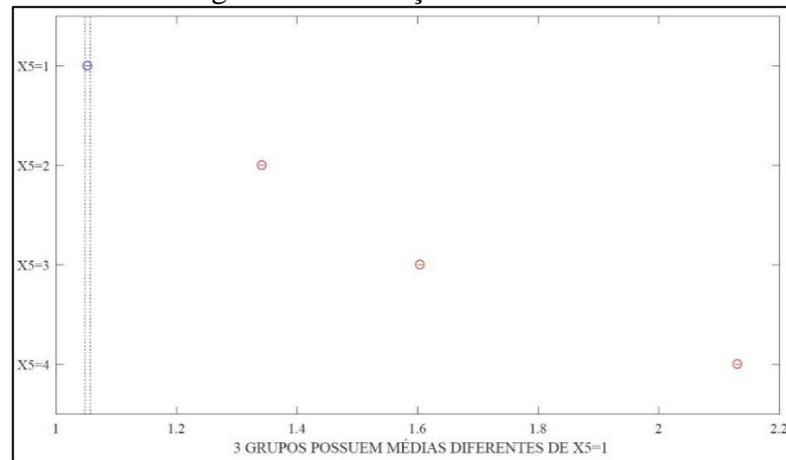
Figura 21 – Raio de ponta



Fonte: Autor (2019)

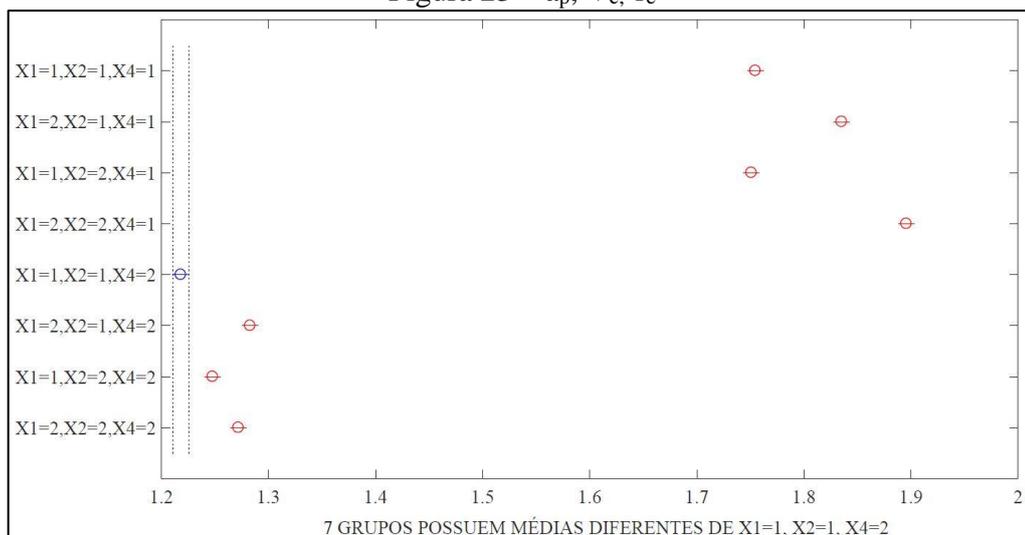
Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** está representado o acabamento superficial de acordo com avanço da ferramenta, demonstrando que, quanto maior o avanço pior a qualidade da peça.

Figura 22 – Avanço da ferramenta



Fonte: Autor (2019)

Na Figura 23 estão relacionadas oito comparações de médias, realizadas com três fatores controláveis: profundidade (X1), velocidade de corte (X2) e cobertura da ferramenta (X3), destacando para esses fatores que, a melhor combinação foi com profundidade de corte de 0,5mm, velocidade de corte de 150mm/min e raio de ponta de 0,8mm. Essa combinação pode ser explicada com embasamento teórico conforme equação (3), diz que para os fatores de menor profundidade e maior raio de ponta resulta em melhores acabamentos superficiais, porém a velocidade deveria ser a maior, o que leva a entender que quando a velocidade foi maior ocorreu alguma alteração talvez por vibração.

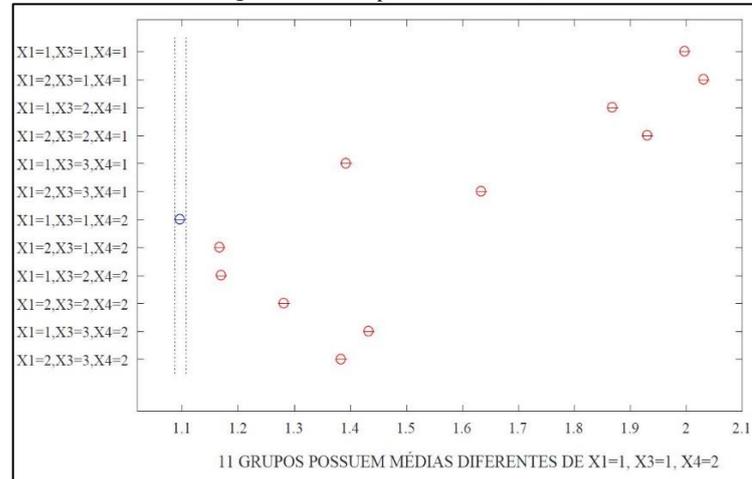
Figura 23 – a_p , V_c , r_e 

Fonte: Autor (2019)

A Figura 24 apresenta as interações feitas com: profundidade de corte, cobertura da ferramenta e raio de ponta, observando-se que o melhor resultado no acabamento superficial foi com as seguintes configurações: profundidade de corte 0,5mm, cobertura da ferramenta

CVD e raio de ponta de 0,8mm, tendo ainda 11 combinações de fatores controláveis com médias significativamente diferentes, e destas 4 combinações com o maior raio de ponta resultando em melhores resultados para o acabamento superficial.

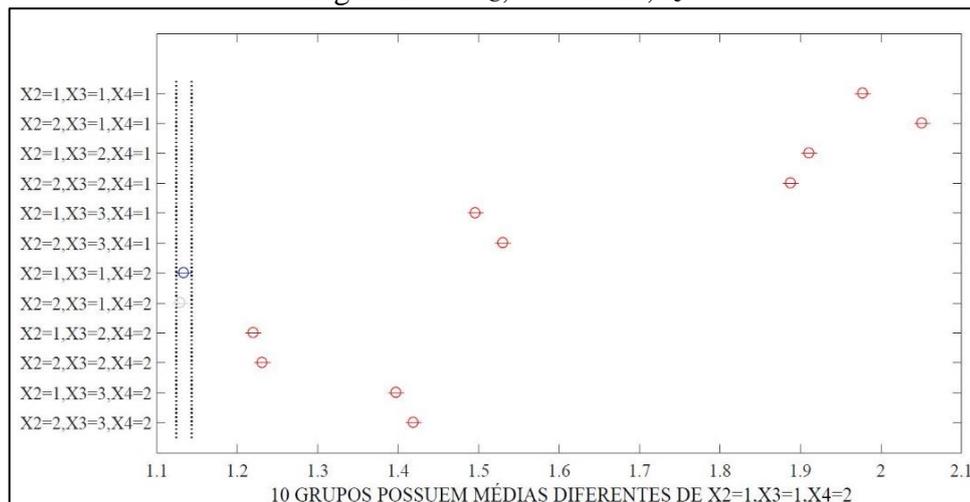
Figura 24 – a_p , Cobertura, r_e .



Fonte: Autor (2019)

A Figura 25 apresenta o resultado de 11 interações entre os fatores controláveis, destacando-se para o melhor acabamento superficial, a combinação de cobertura da ferramenta de PVD, raio de ponta de 0,8mm, porém para esse a velocidade de corte não influenciou no resultado. E para essas combinações o fator raio de ponta, prevalece para o melhor acabamento superficial das peças.

Figura 25 – V_c , Cobertura, r_e

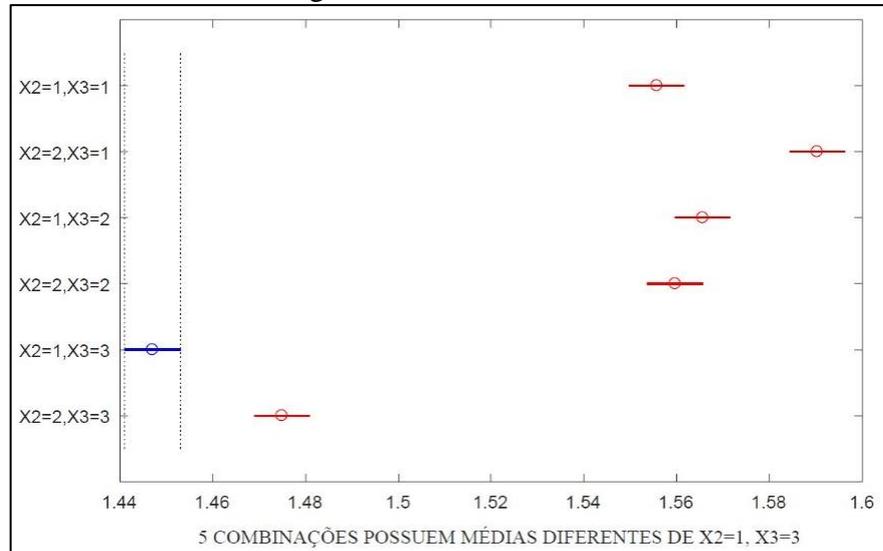


Fonte: Autor (2019)

Na Figura 26 é possível avaliar as combinações de dois fatores controláveis: velocidade de corte e cobertura das ferramentas, quantificando a influência dessas no acabamento R_a das

peças. Constatando que o melhor acabamento nesse caso foi com cobertura CVD, e a menor velocidade de corte.

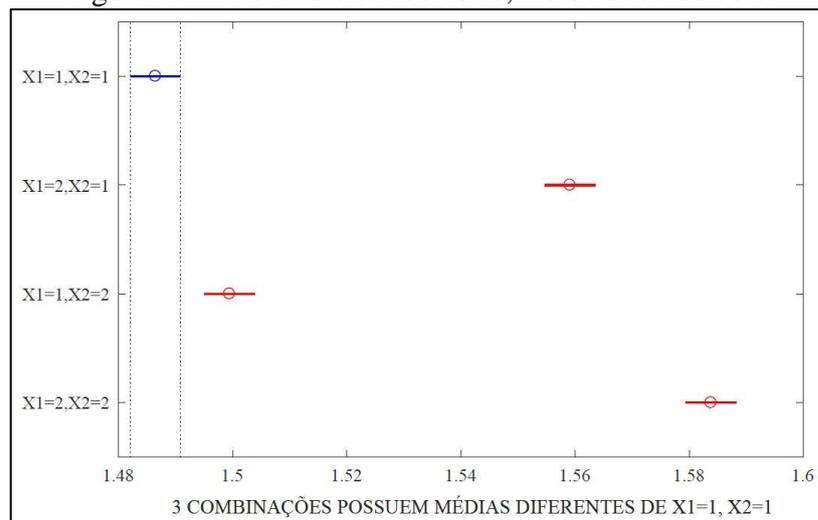
Figura 26 – V_C , Cobertura



Fonte: Autor (2019)

A Figura 27 está relacionando a influência da profundidade e da velocidade de corte, a fim de determinar qual a melhor combinação para esses dois fatores, no quesito de acabamento superficial, destacando-se a menor profundidade de corte e a menor velocidade para se obter o melhor acabamento superficial, sobre o fator de menor profundidade pode-se verificar teoria no item 2.1.3.

Figura 27 – Profundidade de corte, Velocidade de corte

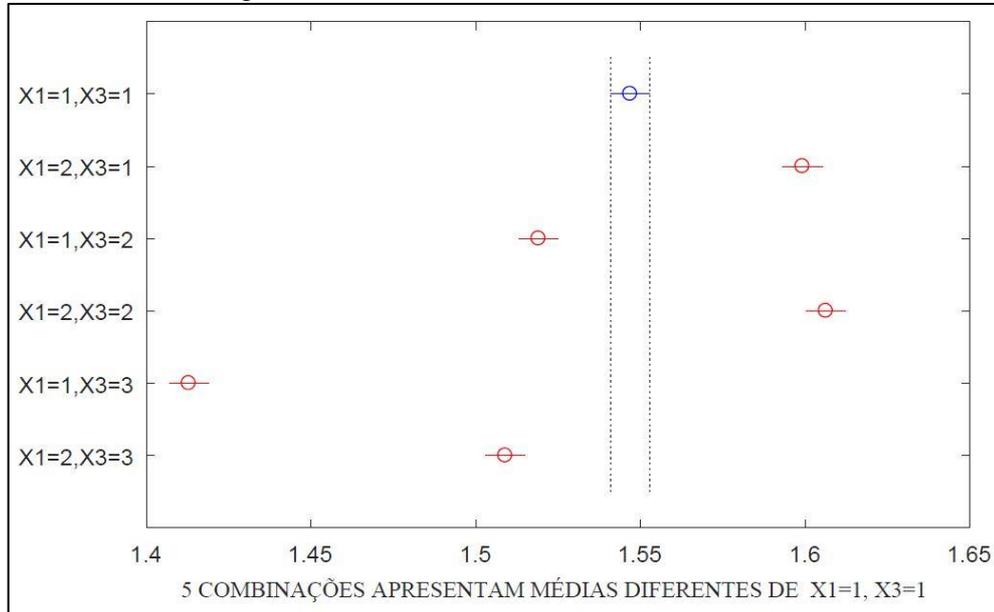


Fonte: Autor (2019)

Na Figura 28 demonstra a combinação entre profundidade de corte e o tipo de cobertura da ferramenta. Realizando 6 interações com esses fatores, é possível identificar que a menor

profundidade de corte juntamente com a cobertura CVD, definem o melhor acabamento superficial da peça.

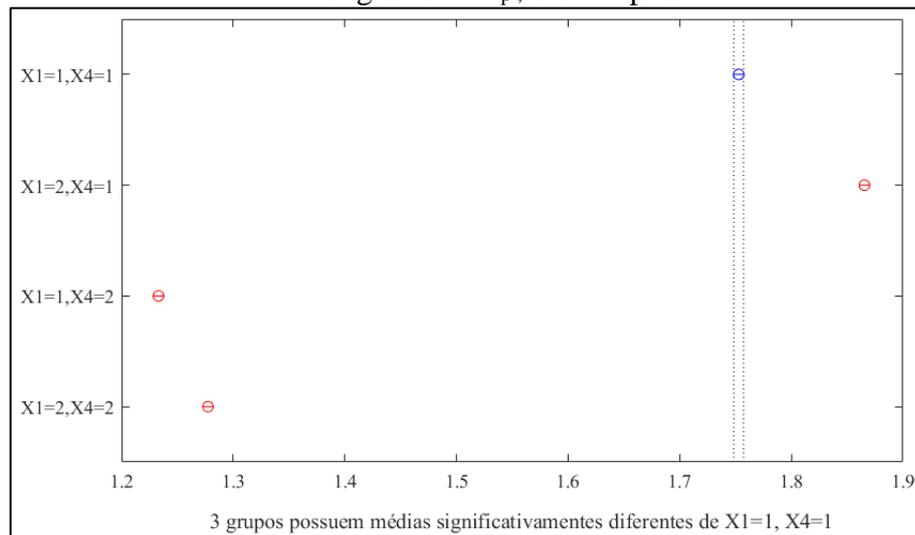
Figura 28 – Profundidade de corte, Cobertura



Fonte: Autor (2019)

A Figura 29 apresenta os fatores controláveis de profundidade de corte X1, e raio de ponta da ferramenta X4, tendo o raio da ponta com fator controlável que possui maior significância nas interações pois quando utilizado o maior raio da ponta resultou nas melhores rugosidades R_a .

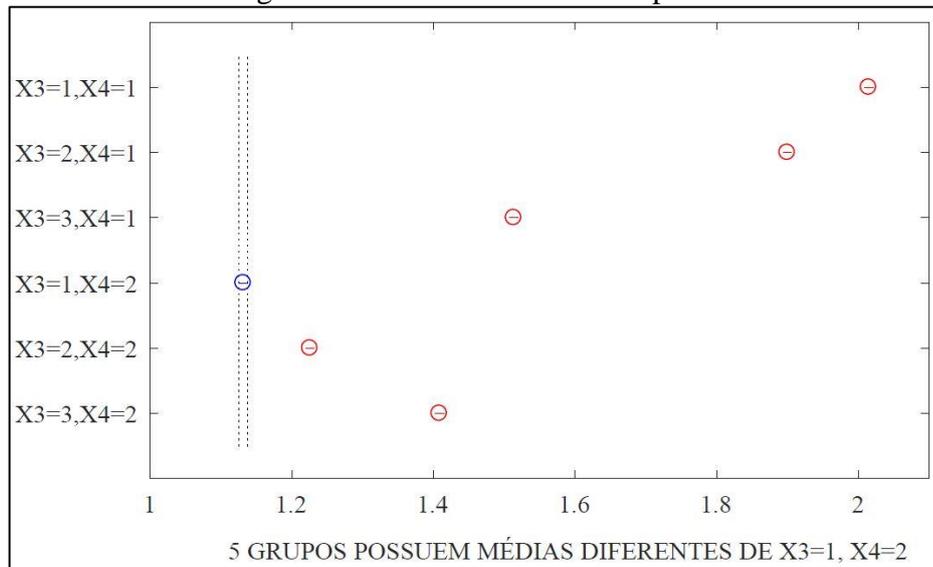
Figura 29 – a_p Raio de ponta



Fonte: Autor (2019)

Na Figura 30 é possível identificar que as interações com o maior raio de ponta da ferramenta resultaram nas melhores qualidades superficiais de R_a , tendo as coberturas de PVD na associação de melhor aplicação para rugosidade.

Figura 30 – Cobertura e Raio da ponta



Fonte: Autor (2019)

No apêndice A, estão apresentados os resultados das interações com todos os fatores controláveis realizados nesse trabalho, sendo esses: profundidade de corte, velocidade de corte, tipo de cobertura, raio de ponta da ferramenta e avanço da ferramenta. Identificando que existem 5 combinações que resultam em médias com valores dentro da confiabilidade de 95%, para a melhor condição de acabamento superficial, destacando-se que pode ser utilizado quaisquer um desses fatores para o mesmo valor de R_a .

A Tabela 4 representa os dados de rugosidades R_z , que foram utilizados para avaliar as influências dos fatores controláveis sobre o acabamento superficial das peças. E a descrição dos fatores controláveis utilizados, para encontrar as relações de fatores controláveis que resultam as melhores condições de acabamento das peças usinadas em SAE-1045.

Tabela 4 – Fatores controláveis e dados de rugosidade R_z

| AVANÇO (X5) | ap(X1) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----------------|--------|-------|------|--------|------|-------|--------|-------|------|--------|--------------------|-----------------|--------|-------|------|--------|------|-------|--------|-------|------|--------|------|
| | 0,5 | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | |
| | VELOCIDADE (X2) | | | | | | | | | | | | VELOCIDADE (X2) | | | | | | | | | | | |
| | 150 | | | | | | 250 | | | | | | 150 | | | | | | 250 | | | | | |
| | COBERTURA (X3) | | | | | | | | | | | | COBERTURA (X3) | | | | | | | | | | | |
| | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD | PVD | CERMET | CVD |
| RAIO DE PONTA (X4) | | | | | | | | | | | | RAIO DE PONTA (X4) | | | | | | | | | | | | |
| 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,4 | 0,8 | |
| 0,120 | 6,96 | 3,58 | 6,88 | 3,62 | 4,73 | 5,01 | 7,14 | 4,07 | 6,80 | 3,89 | 5,21 | 5,17 | 7,62 | 6,66 | 7,02 | 4,80 | 6,15 | 5,65 | 7,70 | 5,19 | 7,27 | 5,02 | 7,80 | 5,48 |
| | 7,01 | 4,09 | 6,67 | 3,53 | 4,86 | 5,07 | 6,94 | 4,43 | 6,70 | 3,58 | 4,83 | 5,12 | 7,23 | 5,27 | 7,22 | 5,11 | 6,28 | 5,89 | 7,53 | 5,19 | 6,75 | 5,02 | 7,60 | 5,27 |
| | 6,79 | 3,98 | 6,49 | 3,68 | 4,80 | 4,89 | 7,00 | 4,07 | 6,68 | 3,71 | 5,27 | 5,10 | 7,42 | 5,54 | 7,47 | 4,49 | 6,30 | 5,53 | 7,55 | 5,82 | 7,21 | 5,15 | 7,55 | 5,27 |
| | 6,89 | 4,16 | 6,40 | 3,86 | 4,69 | 5,00 | 6,90 | 4,13 | 6,61 | 3,52 | 4,91 | 5,17 | 7,66 | 5,52 | 7,12 | 4,60 | 6,18 | 5,60 | 7,38 | 5,45 | 7,07 | 4,70 | 7,56 | 5,30 |
| | 7,23 | 3,86 | 6,41 | 3,86 | 4,83 | 5,07 | 6,63 | 4,20 | 7,03 | 4,04 | 4,99 | 5,15 | 7,71 | 5,93 | 7,24 | 4,27 | 6,20 | 5,65 | 7,48 | 5,68 | 7,22 | 4,72 | 7,40 | 5,40 |
| | 7,02 | 3,90 | 6,53 | 3,92 | 4,17 | 4,95 | 7,14 | 3,98 | 6,91 | 3,37 | 5,02 | 5,10 | 7,66 | 6,52 | 7,11 | 4,26 | 6,23 | 5,80 | 7,46 | 5,04 | 7,66 | 4,68 | 7,46 | 5,28 |
| 0,140 | 8,00 | 4,31 | 7,00 | 4,60 | 5,52 | 5,87 | 7,84 | 4,64 | 7,62 | 4,21 | 6,18 | 5,83 | 8,82 | 7,34 | 7,85 | 5,75 | 7,50 | 6,32 | 8,40 | 5,32 | 8,13 | 5,31 | 8,35 | 6,69 |
| | 8,19 | 4,45 | 7,20 | 4,70 | 5,79 | 5,56 | 7,71 | 4,76 | 7,54 | 4,10 | 6,06 | 5,88 | 8,83 | 6,85 | 8,20 | 5,32 | 7,41 | 6,05 | 8,27 | 5,62 | 8,07 | 5,32 | 8,30 | 6,45 |
| | 7,93 | 4,33 | 7,93 | 4,33 | 5,87 | 5,73 | 7,93 | 4,57 | 7,69 | 4,18 | 6,12 | 5,82 | 8,43 | 6,88 | 8,20 | 4,74 | 7,38 | 6,18 | 8,22 | 5,50 | 8,44 | 5,54 | 8,15 | 6,25 |
| | 7,81 | 4,52 | 7,55 | 4,59 | 5,59 | 5,58 | 7,90 | 4,94 | 7,66 | 4,29 | 5,41 | 5,82 | 8,86 | 6,86 | 7,88 | 5,29 | 7,45 | 6,15 | 8,41 | 5,51 | 8,36 | 5,13 | 8,41 | 6,45 |
| | 7,96 | 4,45 | 7,43 | 4,28 | 5,53 | 5,70 | 8,09 | 4,72 | 7,24 | 4,12 | 5,32 | 5,83 | 8,40 | 7,56 | 8,13 | 5,33 | 7,40 | 6,18 | 8,06 | 5,73 | 7,70 | 5,38 | 8,10 | 5,64 |
| | 7,99 | 4,70 | 7,50 | 4,70 | 5,57 | 5,72 | 7,83 | 4,80 | 7,32 | 4,36 | 5,34 | 5,84 | 8,74 | 7,56 | 8,10 | 5,07 | 7,60 | 6,18 | 8,31 | 5,85 | 7,96 | 5,16 | 8,30 | 6,28 |
| 0,160 | 9,56 | 5,12 | 8,71 | 5,48 | 6,32 | 6,87 | 9,75 | 4,99 | 8,30 | 5,00 | 6,31 | 6,70 | 9,85 | 7,32 | 9,35 | 6,42 | 8,44 | 7,02 | 9,70 | 6,40 | 9,29 | 6,43 | 9,60 | 7,22 |
| | 9,16 | 5,04 | 8,73 | 5,43 | 6,28 | 6,86 | 9,11 | 4,85 | 8,76 | 5,41 | 6,48 | 6,68 | 9,71 | 7,29 | 8,93 | 6,28 | 8,40 | 6,82 | 9,31 | 6,10 | 9,38 | 6,43 | 9,40 | 6,85 |
| | 9,17 | 5,09 | 8,56 | 5,26 | 6,42 | 6,64 | 8,79 | 5,43 | 8,52 | 5,27 | 6,37 | 7,03 | 9,88 | 6,99 | 9,32 | 6,23 | 8,42 | 6,86 | 9,48 | 6,38 | 9,09 | 6,47 | 9,48 | 6,54 |
| | 9,59 | 5,48 | 8,75 | 5,33 | 6,15 | 6,75 | 8,96 | 5,18 | 8,44 | 5,35 | 5,85 | 6,71 | 9,95 | 6,77 | 8,95 | 5,89 | 8,50 | 6,85 | 9,44 | 6,06 | 9,07 | 6,28 | 9,45 | 7,02 |
| | 9,16 | 5,32 | 8,59 | 5,21 | 6,13 | 6,87 | 8,92 | 4,77 | 8,35 | 5,12 | 5,96 | 6,70 | 9,84 | 7,26 | 9,19 | 6,15 | 8,43 | 6,82 | 9,13 | 5,95 | 9,06 | 6,20 | 9,20 | 6,80 |
| | 9,10 | 5,02 | 8,44 | 5,63 | 6,38 | 6,88 | 8,91 | 5,13 | 8,63 | 5,00 | 5,91 | 6,72 | 9,78 | 6,87 | 9,13 | 6,33 | 8,40 | 6,90 | 9,44 | 6,30 | 9,29 | 6,11 | 9,50 | 6,92 |
| 0,200 | 11,36 | 6,63 | 10,88 | 7,57 | 7,70 | 7,64 | 11,12 | 6,91 | 10,63 | 8,05 | 7,92 | 7,54 | 9,85 | 8,87 | 11,72 | 9,14 | 9,40 | 8,06 | 11,74 | 7,84 | 11,74 | 8,67 | 11,70 | 8,63 |
| | 11,27 | 7,13 | 10,84 | 7,56 | 7,88 | 7,63 | 11,22 | 7,13 | 11,02 | 7,97 | 7,85 | 7,51 | 9,71 | 10,05 | 11,41 | 8,18 | 9,37 | 8,95 | 11,77 | 7,71 | 11,28 | 8,53 | 11,68 | 8,17 |
| | 11,55 | 7,10 | 11,04 | 7,55 | 7,62 | 7,41 | 11,06 | 7,00 | 10,60 | 7,94 | 7,81 | 7,46 | 9,88 | 8,89 | 11,27 | 8,58 | 9,42 | 8,55 | 11,75 | 7,84 | 11,35 | 8,43 | 11,75 | 8,63 |
| | 11,11 | 6,64 | 10,90 | 7,51 | 8,60 | 7,60 | 11,27 | 6,80 | 10,67 | 7,84 | 7,89 | 7,50 | 9,95 | 9,08 | 11,26 | 8,62 | 9,43 | 8,60 | 11,87 | 7,85 | 11,30 | 8,30 | 11,87 | 8,18 |
| | 11,44 | 6,67 | 10,96 | 7,36 | 7,90 | 7,64 | 11,22 | 6,72 | 10,40 | 7,86 | 7,68 | 7,48 | 9,84 | 8,84 | 11,29 | 8,59 | 9,35 | 8,58 | 11,98 | 7,67 | 11,41 | 8,41 | 11,95 | 8,45 |
| | 11,64 | 6,92 | 10,79 | 7,56 | 8,07 | 7,50 | 11,00 | 6,77 | 10,41 | 7,78 | 7,79 | 7,49 | 9,78 | 9,12 | 11,34 | 8,32 | 9,45 | 8,90 | 11,76 | 7,67 | 11,45 | 8,21 | 11,85 | 8,60 |

Fonte: Autor (2019)

Sendo:

- X1 = Profundidade de corte (0,5 ou 1,00 mm);
- X2 = Velocidade de corte (150 ou 250 m/min);
- X3 = Cobertura da ferramenta (PVD, CVD ou CERMET);
- X4 = Raio de ponta da ferramenta (0,4 ou 0,8 mm);
- X5 = Avanço (0,12, 0,16, 0,18 ou 0,20 mm/rot).

A seguir estão as figuras que apresentam os dados e testes realizados, para verificar a contribuição dos fatores controláveis, no aspecto de acabamento superficial das peças, utilizando-se para quantificar a superfície o parâmetro de rugosidade R_z .

A Figura 31 apresenta os valores da análise de variância para rugosidade R_z , realizado pela função *anovan* do software *Matlab*, essa função avalia os fatores controláveis, e apresenta os resultados das: soma dos quadrados, a média dos quadrados, os graus de liberdade, o fator F e o teste de hipótese P. Sendo que quanto maior for o valor de F, mais significativo é esse fator sobre o processo analisado, nesse caso na influência da rugosidade R_z . Identificando-se que o

fator, raio de ponta da ferramenta analisado em todas as possibilidades é o fator que mais influência no acabamento superficial da peça, seguido pelo avanço da ferramenta, e o fator que possui menor contribuição é o avanço da ferramenta.

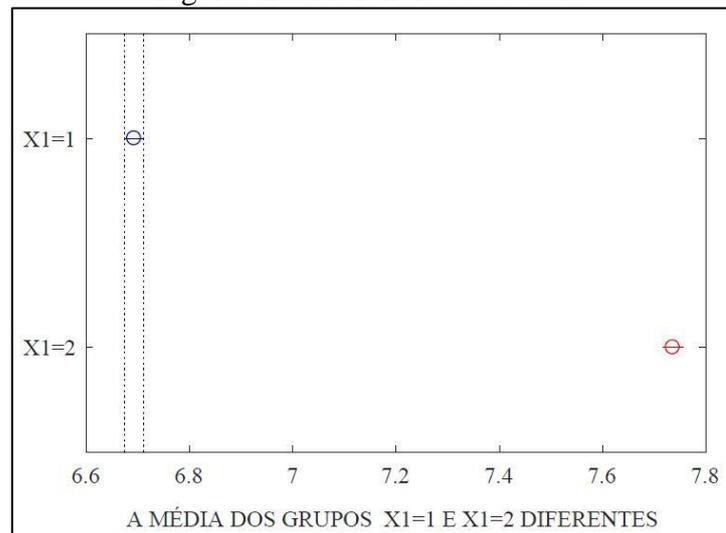
Figura 31 – Análise de variância para R_z

| ANOVA PARA R_z | | | | | |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------|--------|
| Fatores Controláveis | Soma dos Quadrados | Graus de Liberdade | Média dos Quadrados | F | Prob>F |
| X1 | 156.74 | 1 | 156.74 | 2883.98 | 0 |
| X2 | 0.18 | 1 | 0.177 | 3.25 | 0.072 |
| X3 | 25.92 | 2 | 12.962 | 238.5 | 0 |
| X4 | 741.22 | 1 | 741.223 | 13638.32 | 0 |
| X5 | 950.03 | 3 | 316.678 | 5826.79 | 0 |
| X1*X2 | 0.59 | 1 | 0.59 | 10.85 | 0.0011 |
| X1*X3 | 13.45 | 2 | 6.725 | 123.74 | 0 |
| X1*X4 | 0.1 | 1 | 0.103 | 1.9 | 0.1688 |
| X1*X5 | 0.02 | 3 | 0.007 | 0.12 | 0.9485 |
| X2*X3 | 7.7 | 2 | 3.85 | 70.83 | 0 |
| X2*X4 | 6.02 | 1 | 6.021 | 110.78 | 0 |
| X2*X5 | 2.6 | 3 | 0.866 | 15.94 | 0 |
| X3*X4 | 148.98 | 2 | 74.49 | 1370.6 | 0 |
| X3*X5 | 16.68 | 6 | 2.781 | 51.17 | 0 |
| X4*X5 | 8.63 | 3 | 2.875 | 52.9 | 0 |
| X1*X2*X3 | 5.88 | 2 | 2.94 | 54.1 | 0 |
| X1*X2*X4 | 10.09 | 1 | 10.089 | 185.63 | 0 |
| X1*X2*X5 | 1.93 | 3 | 0.643 | 11.83 | 0 |
| X1*X3*X4 | 67.29 | 2 | 33.645 | 619.05 | 0 |
| X1*X3*X5 | 5.42 | 6 | 0.903 | 16.62 | 0 |
| X1*X4*X5 | 1.49 | 3 | 0.498 | 9.16 | 0 |
| X2*X3*X4 | 4.5 | 2 | 2.251 | 41.43 | 0 |
| X2*X3*X5 | 0.99 | 6 | 0.164 | 3.03 | 0.0065 |
| X2*X4*X5 | 2.42 | 3 | 0.807 | 14.85 | 0 |
| X3*X4*X5 | 5.44 | 6 | 0.907 | 16.7 | 0 |
| X1*X2*X3*X4 | 4.37 | 2 | 2.186 | 40.21 | 0 |
| X1*X2*X3*X5 | 3.69 | 6 | 0.615 | 11.31 | 0 |
| X1*X2*X4*X5 | 5.32 | 3 | 1.774 | 32.64 | 0 |
| X1*X3*X4*X5 | 2.81 | 6 | 0.469 | 8.63 | 0 |
| X2*X3*X4*X5 | 3.3 | 6 | 0.55 | 10.12 | 0 |
| X1*X2*X3*X4*X5 | 1.51 | 6 | 0.252 | 4.63 | 0.0001 |
| Erro | 26.09 | 480 | 0.054 | | |
| Total | 2231.42 | 575 | | | |

Fonte: Autor (2019)

A Figura 32 apresenta a relação da profundidade de corte sobre o acabamento superficial da peça, destacando que menor profundidade de corte resulta em acabamentos melhores, e maiores profundidades pior fica o acabamento, resultando que para desbaste pode ser utilizado maior profundidade e no processo de acabamento pequenas profundidade de corte.

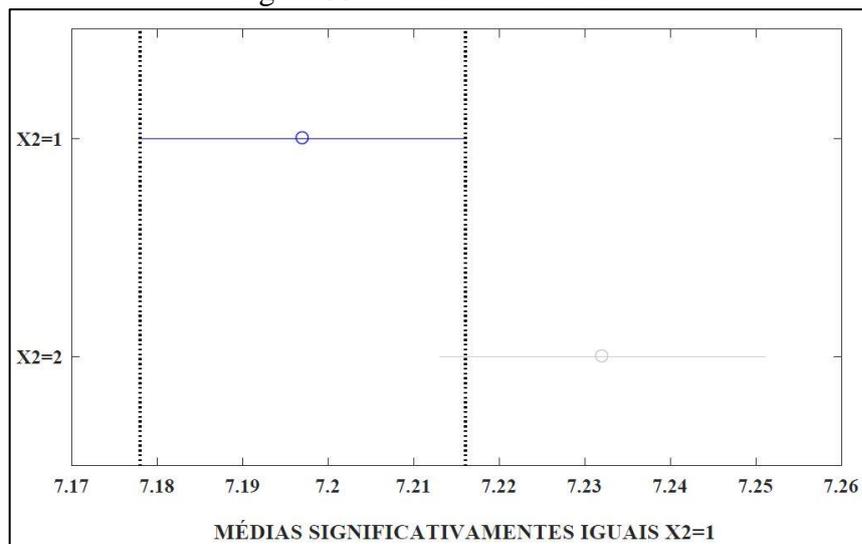
Figura 32 – Profundidade de corte



Fonte: Autor (2019)

A Figura 33 apresenta o fator controlável de velocidade de corte e sua influência no acabamento superficial da peça, relacionando esse fator com todos os demais fatores analisados é possível definir que não existem médias significantes diferentes, para maior ou menor velocidade de corte, ambas resultam na mesma qualidade superficial.

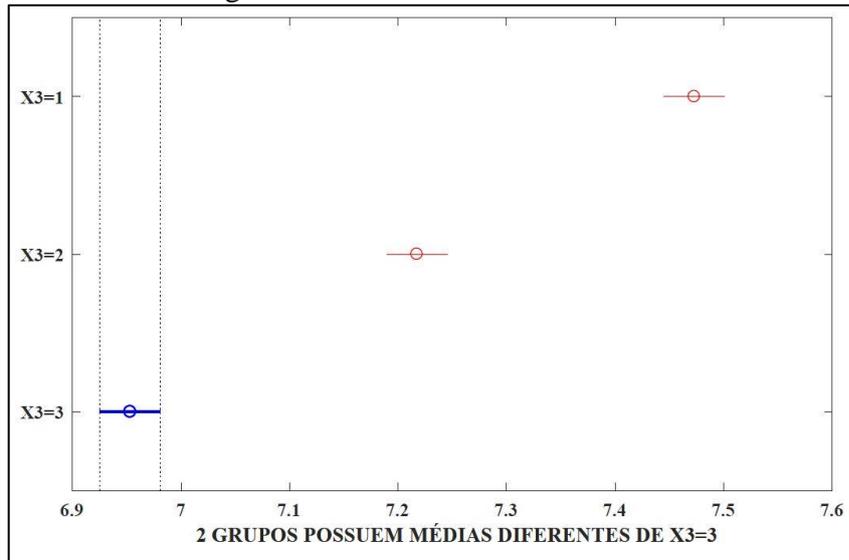
Figura 33 – Velocidade de corte



Fonte: Autor (2019)

Na Figura 34 está representada as coberturas das ferramentas, realizando a análise de variância deste fator em relação aos demais fatores controláveis, é possível concluir e quantificar sendo que a cobertura CVD, apresentou o melhor resultado para o acabamento, e para a pior condição de acabamento ficou na utilização de ferramentas com cobertura e o *CERMET* como uma ferramenta intermediária para esse processo.

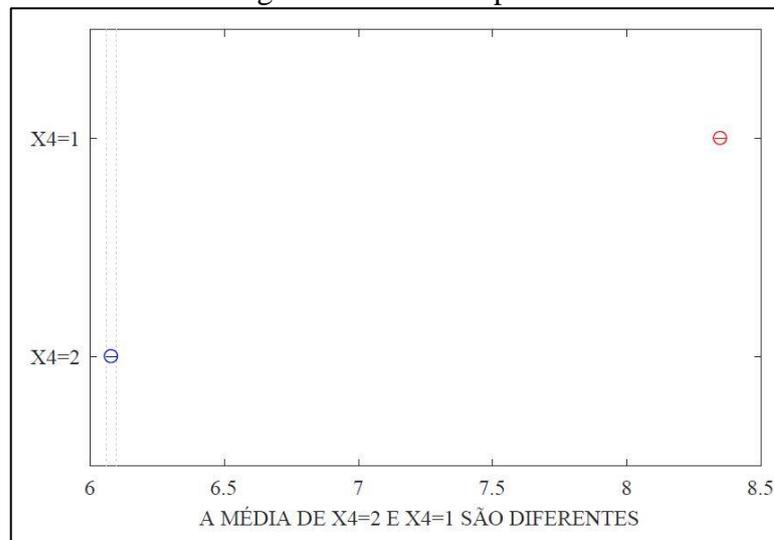
Figura 34 – Cobertura da ferramenta



Fonte: Autor (2019)

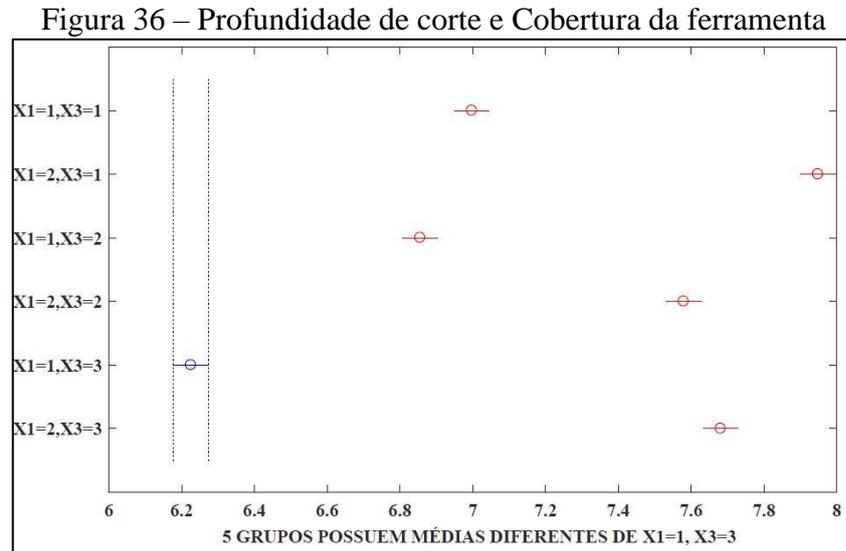
A Figura 35 demonstra o fator controlável raio de ponta da ferramenta, apresentando que a menor rugosidade é atingida quando utilizado o maior raio de ponta, isso pode ser explicado de acordo com a maior área de contato da ferramenta na operação.

Figura 35 – Raio de ponta



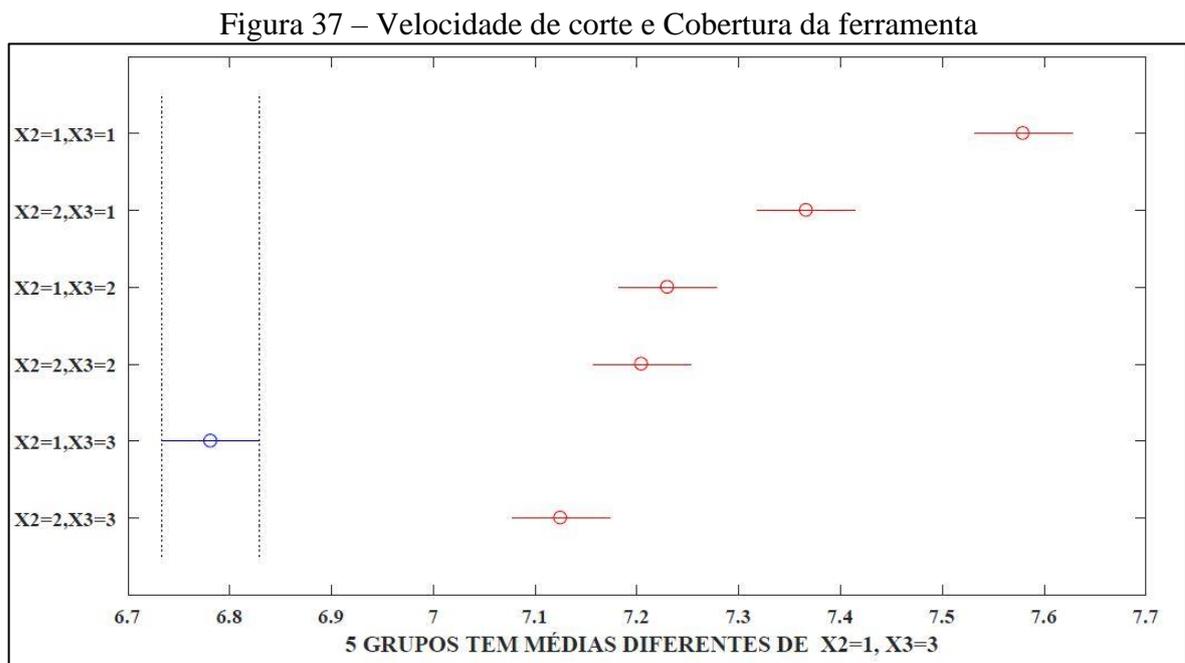
Fonte: Autor (2019)

A Figura 36 apresenta a combinação de dois fatores controláveis, a velocidade de corte e a cobertura das ferramentas. Pode-se afirmar que a condição de menor profundidade de corte e a cobertura CVD resultam na melhor combinação para se obter o menor valor de rugosidade R_z . Sendo que para acabamentos é recomendável profundidades menores comparadas ao desbaste.



Fonte: Autor (2019)

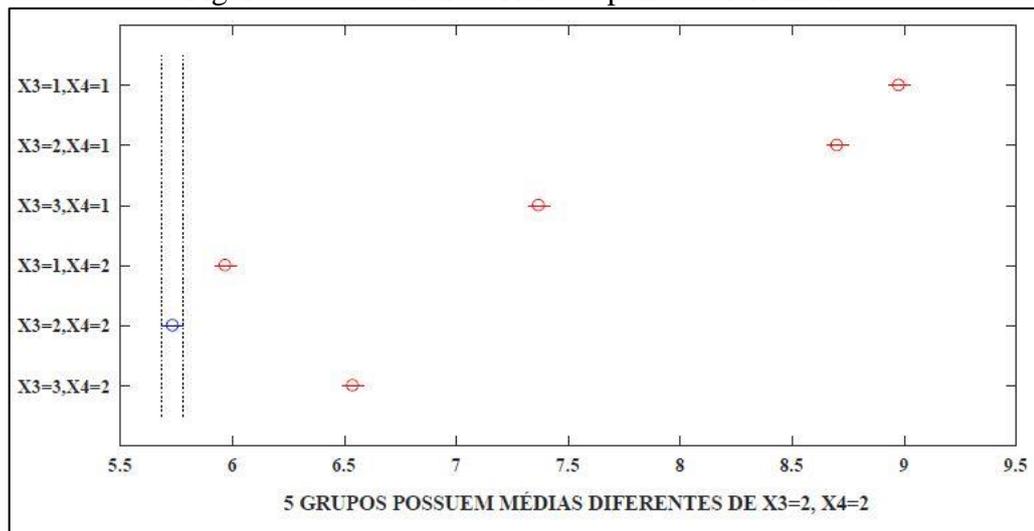
A Figura 37 apresenta a velocidade de corte e a cobertura das ferramentas, destacando para o melhor acabamento superficial, os fatores de menor velocidade de corte e cobertura CVD. Pode ter ocorrido vibrações na usinagem quando se utilizou maiores velocidades de corte.



Fonte: Autor (2019)

Representada na Figura 38 a relação dos fatores controláveis: cobertura e raio de ponta das ferramentas, definindo-se que a melhor rugosidade R_z foi estabelecida com raio de ponta maior e com cobertura *Cermet*. É possível analisar que o raio de ponta foi o fator mais relevante nessa combinação, pois os melhores acabamentos estão com a relação de maior raio de ponta.

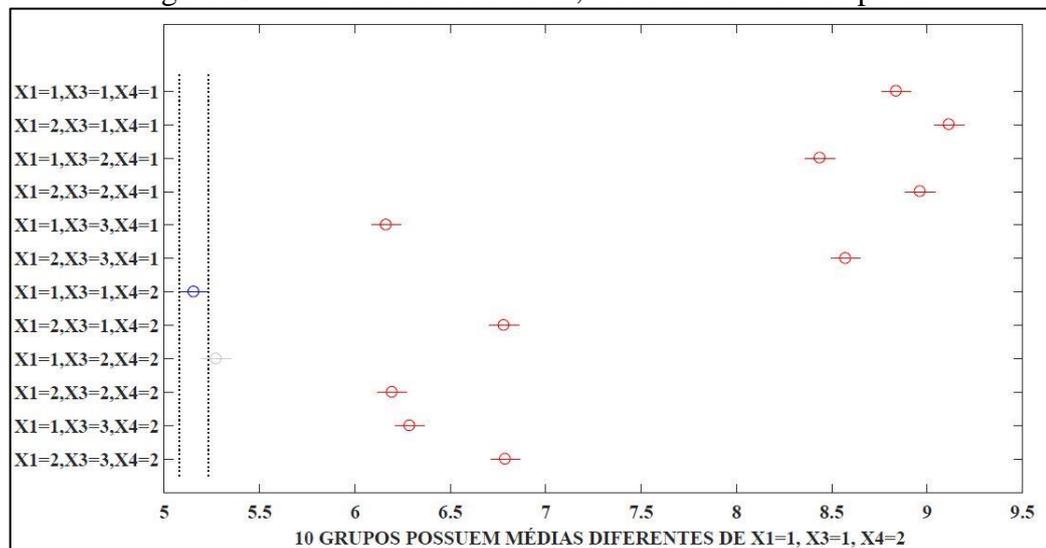
Figura 38 – Cobertura e Raio de ponta da ferramenta



Fonte: Autor (2019)

A Figura 39 apresenta as interações realizadas com três fatores controláveis: a profundidade de corte, a cobertura da ferramenta e o raio de ponta. Resultando que para duas combinações as médias são significativamente iguais, ou seja, qualquer uma dessas interações que forem escolhidas o resultado no acabamento superficial será o mesmo, novamente o raio de ponta se destaca entre as melhores combinações.

Figura 39 – Profundidade de corte, Cobertura e Raio de ponta



Fonte: Autor (2019)

5.1 CONCLUSÃO

Conforme os resultados obtidos na análise de variância e na coleta dos dados de rugosidades R_a e R_z , no decorrer deste trabalho, pode-se concluir que:

A escolha da geometria do corpo de prova foi satisfatória, pois é possível analisar oito combinações para a mesma ferramenta, minimizando o tempo de parada do torno CNC, e consequentemente facilitando a programação da usinagem.

Nesse trabalho utilizaram-se cinco fatores controláveis e suas influências no acabamento superficial da peça. Os fatores escolhidos foram: a profundidade de corte (X1); a velocidade de corte (X2); a cobertura das ferramentas (X3); o raio de ponta da ferramenta (X4) e o avanço da ferramenta (X5). Obteve-se sucesso na escolha desses fatores, pois após o teste de variância constatou-se a significância individual ou combinada de cada fator na rugosidade superficial da peça.

Realizar a usinagem dos corpos de prova no torno CNC foi de grande importância para garantir a repetibilidade dos processos, assim como minimizar erros de operação de máquina na usinagem das peças. Porém os dados apresentaram uma interferência que pode ser pela vibração da máquina ou da ferramenta. Mesmo com essa interferência obteve-se dados consistentes após a análise de variância.

No quesito de medição de rugosidade os dados coletados com o rugosímetro apresentaram uma linearidade, o que indica que todos os processos foram executados de acordo com as especificações desejadas.

A utilização do método de variância do *software Matlab*, para avaliar os dados de rugosidades encontrados nos experimentos, foi fundamental e rápido para poder entender as análises de combinações dos fatores escolhidos. Com isso os resultados gerados na forma de imagens facilitam o entendimento da influência sofrida na rugosidade, destacando o raio de ponta como o principal fator de contribuição para o acabamento superficial no processo de torneamento do aço SAE-1045.

Com a utilização da probabilidade de significância hipótese p para validar a significância dos fatores controláveis sobre as médias obtidas, para garantir uma confiabilidade de 95% nos resultados obtidos.

A proposta do trabalho buscou definir a influência das coberturas *CVD*, *CERMET* e *PVD* sobre o acabamento superficial, resultando que para quase todas as combinações dos fatores controláveis a ferramenta com cobertura *CVD* se mostrou mais versátil, pois resultou em melhores acabamentos. Da mesma forma que a ferramenta com cobertura *PVD*, apresentou os piores dados para o acabamento. Com isso é possível afirmar que realizando as combinações corretas as ferramentas com cobertura *CVD* para a usinagem do aço SAE-1045, resultam em melhores condições de acabamento e melhor rendimento produtivo.

Para todas combinações que apresentaram aumento do avanço consequentemente encontrou-se o pior resultado de rugosidade.

O aumento da velocidade de avanço da ferramenta mesmo isolado resulta em acabamentos superficiais piores no quesito R_a e R_z .

O raio de ponta da ferramenta nesse experimento foi muito significativo, pois nas combinações dos fatores que estiveram presentes, na maioria definiram valores melhores para rugosidade R_a , quando se utilizou o raio da ferramenta de 0,8mm.

Não se observou influência da velocidade de corte sobre os dados obtidos para rugosidades R_z no trabalho, abrindo aqui um precedente para investigar qual ou quais os ruídos que possam ter no experimento.

Na profundidade de corte é possível avaliar que menores profundidade de corte, resulta em melhores acabamentos superficiais das peças.

5.1.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Afim de contribuir com esse trabalho, segue algumas opções de melhorias ou implementações na análise.

- a) Repetir o experimento com a inclusão de mais fatores controláveis.
- b) Durante o processo de usinagem acompanhar a formação dos cavacos para verificar se o ruído dos experimentos possa ser dos parâmetros de corte.
- c) Realizar uma correlação entre os dados de R_a e R_z
- d) Realizar um teste de aleatoriedade nos dados de rugosidades para posteriormente avaliá-los.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 4287:2002. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade.

Belbah, A.; et al. On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations. **At SciVerse ScienceDirect, Measurement**, v.46, p.1671-1681, 13 junho 2019.

DAGNALL, H. **Exploring Surfaces Texture**. 2.ed. Londres, 1986.

DAVIM, J. Paulo (Ed). **Machining: Fundamentals and Recent Advances**. New York, U.S.: Springer, 2008.

D'Addona, D.; Raykar, S. Analysis of surface roughness in hard turning using wiper insert geometry. **48 th CIRP. Conference on manufacturing systems – CIRP CMS 2015**, v. 41, p, 841-846, 12 junho 2019.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F.C; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Editora Artliber. 2.ed.2008.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F.C; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Editora Artliber. 9.ed.2014.

FAVORIT. Aços especiais: Catálogo técnico Favorit. 12.ed., 2013.

FERRARESI, D. **Usinagem dos metais: Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo. Editora Edgar Blucher Ltda, 1970.

GEIER, M.; MELLO, M. S.; SOUZA, A. J. **Comparação entre ferramenta alisadora e ferramenta convencional no torneamento de acabamento para aços baixo carbono e baixa liga**. 2011. 10 f. Artigo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

Quebra cavaco Wp. Disponível em: http://www.kyocera-componentes.com.br/downloads/CP358_WIPER_PT_WEB.pdf

MACHADO, A. R; *et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo. Blucher, 2011.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. Arizona. Copyright 2005, John Wiley e Sons, INC. 6th ed.

NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. São Paulo. Editora Edgar Blucher Ltda, 1994.

Revista ibero-americana de ingenieria mecánica vol. 19, Nº 1, pp.71-86,2015

SANTOS, S. C; SALES, W.F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo. Artliber, 2007.

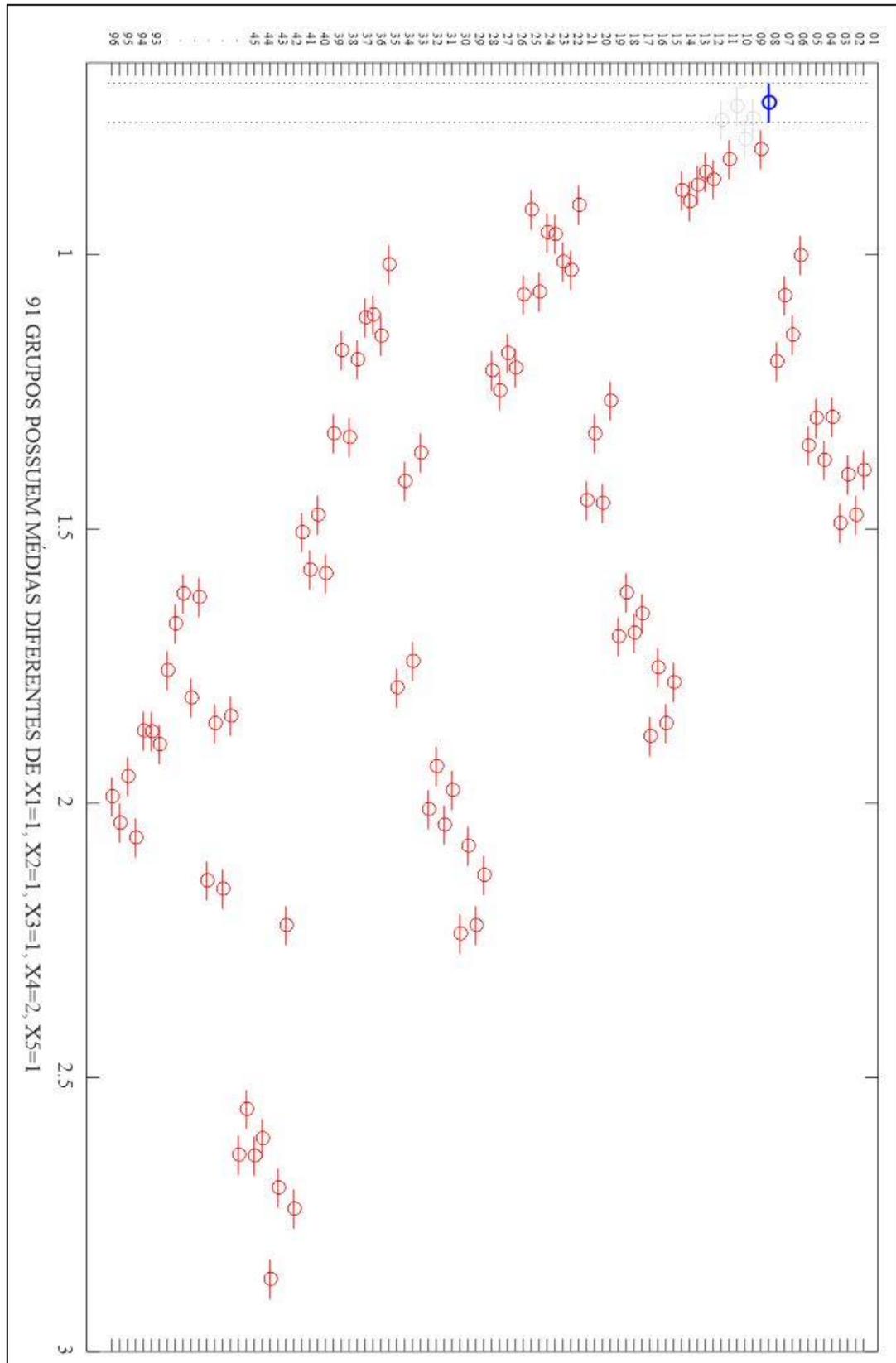
SANDVIK COROMANT BRASIL. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/tools.aspx>: Acessado em: Junho. 2019.

SCHUTZER, K; SCHULZ, H. (2003). **Histórico da usinagem com altíssima velocidade até os dias atuais**. São Paulo; Editora Érica Ltda. Cap.01, p. 13-28.

TRENT, E.M.; WRIGHT,P.K. **Metal Cutting**. 4. Ed. Butterworth Heinemann, 2000.

VIEIRA, S. **Análise de Variância (Anova)**. São Paulo. Editora Atlas S.A, 2006.

APÊNDICE - A INTERAÇÕES COM TODOS OS FATORES CONTROLÁVEIS



Fonte: Autor (2019)

| | | | | | |
|----|--------------------------|----|--------------------------|----|--------------------------|
| 1 | X1=2,X2=2,X3=3,X4=2,X5=4 | 47 | X1=2,X2=1,X3=1,X4=1,X5=3 | 91 | X1=2,X2=1,X3=2,X4=1,X5=1 |
| 2 | X1=1,X2=2,X3=3,X4=2,X5=4 | 48 | X1=1,X2=1,X3=1,X4=1,X5=3 | 92 | X1=1,X2=1,X3=2,X4=1,X5=1 |
| 3 | X1=2,X2=1,X3=3,X4=2,X5=4 | 49 | X1=2,X2=2,X3=3,X4=2,X5=2 | 93 | X1=2,X2=2,X3=1,X4=1,X5=1 |
| 4 | X1=1,X2=1,X3=3,X4=2,X5=4 | 50 | X1=1,X2=2,X3=3,X4=2,X5=2 | 94 | X1=1,X2=2,X3=1,X4=1,X5=1 |
| 5 | X1=2,X2=2,X3=2,X4=2,X5=4 | 51 | X1=2,X2=1,X3=3,X4=2,X5=2 | 95 | X1=2,X2=1,X3=1,X4=1,X5=1 |
| 6 | X1=1,X2=2,X3=2,X4=2,X5=4 | 52 | X1=1,X2=1,X3=3,X4=2,X5=2 | 96 | X1=1,X2=1,X3=1,X4=1,X5=1 |
| 7 | X1=2,X2=1,X3=2,X4=2,X5=4 | 53 | X1=2,X2=2,X3=2,X4=2,X5=2 | | |
| 8 | X1=1,X2=1,X3=2,X4=2,X5=4 | 54 | X1=1,X2=2,X3=2,X4=2,X5=2 | | |
| 9 | X1=2,X2=2,X3=1,X4=2,X5=4 | 55 | X1=2,X2=1,X3=2,X4=2,X5=2 | | |
| 10 | X1=1,X2=2,X3=1,X4=2,X5=4 | 56 | X1=1,X2=1,X3=2,X4=2,X5=2 | | |
| 11 | X1=2,X2=1,X3=1,X4=2,X5=4 | 57 | X1=2,X2=2,X3=1,X4=2,X5=2 | | |
| 12 | X1=1,X2=1,X3=1,X4=2,X5=4 | 58 | X1=1,X2=2,X3=1,X4=2,X5=2 | | |
| 13 | X1=2,X2=2,X3=3,X4=1,X5=4 | 59 | X1=2,X2=1,X3=1,X4=2,X5=2 | | |
| 14 | X1=1,X2=2,X3=3,X4=1,X5=4 | 60 | X1=1,X2=1,X3=1,X4=2,X5=2 | | |
| 15 | X1=2,X2=1,X3=3,X4=1,X5=4 | 61 | X1=2,X2=2,X3=3,X4=1,X5=2 | | |
| 16 | X1=1,X2=1,X3=3,X4=1,X5=4 | 62 | X1=1,X2=2,X3=3,X4=1,X5=2 | | |
| 17 | X1=2,X2=2,X3=2,X4=1,X5=4 | 63 | X1=2,X2=1,X3=3,X4=1,X5=2 | | |
| 18 | X1=1,X2=2,X3=2,X4=1,X5=4 | 64 | X1=1,X2=1,X3=3,X4=1,X5=2 | | |
| 19 | X1=2,X2=1,X3=2,X4=1,X5=4 | 65 | X1=2,X2=2,X3=2,X4=1,X5=2 | | |
| 20 | X1=1,X2=1,X3=2,X4=1,X5=4 | 66 | X1=1,X2=2,X3=2,X4=1,X5=2 | | |
| 21 | X1=2,X2=2,X3=1,X4=1,X5=4 | 67 | X1=2,X2=1,X3=2,X4=1,X5=2 | | |
| 22 | X1=1,X2=2,X3=1,X4=1,X5=4 | 68 | X1=1,X2=1,X3=2,X4=1,X5=2 | | |
| 23 | X1=2,X2=1,X3=1,X4=1,X5=4 | 69 | X1=2,X2=2,X3=1,X4=1,X5=2 | | |
| 24 | X1=1,X2=1,X3=1,X4=1,X5=4 | 70 | X1=1,X2=2,X3=1,X4=1,X5=2 | | |
| 25 | X1=2,X2=2,X3=3,X4=2,X5=3 | 71 | X1=2,X2=1,X3=1,X4=1,X5=2 | | |
| 26 | X1=1,X2=2,X3=3,X4=2,X5=3 | 72 | X1=1,X2=1,X3=1,X4=1,X5=2 | | |
| 27 | X1=2,X2=1,X3=3,X4=2,X5=3 | 73 | X1=2,X2=2,X3=3,X4=2,X5=1 | | |
| 28 | X1=1,X2=1,X3=3,X4=2,X5=3 | 74 | X1=1,X2=2,X3=3,X4=2,X5=1 | | |
| 29 | X1=2,X2=2,X3=2,X4=2,X5=3 | 75 | X1=2,X2=1,X3=3,X4=2,X5=1 | | |
| 30 | X1=1,X2=2,X3=2,X4=2,X5=3 | 76 | X1=1,X2=1,X3=3,X4=2,X5=1 | | |
| 31 | X1=2,X2=1,X3=2,X4=2,X5=3 | 77 | X1=2,X2=2,X3=2,X4=2,X5=1 | | |
| 32 | X1=1,X2=1,X3=2,X4=2,X5=3 | 78 | X1=1,X2=2,X3=2,X4=2,X5=1 | | |
| 33 | X1=2,X2=2,X3=1,X4=2,X5=3 | 79 | X1=2,X2=1,X3=2,X4=2,X5=1 | | |
| 34 | X1=1,X2=2,X3=1,X4=2,X5=3 | 80 | X1=1,X2=1,X3=2,X4=2,X5=1 | | |
| 35 | X1=2,X2=1,X3=1,X4=2,X5=3 | 81 | X1=2,X2=2,X3=1,X4=2,X5=1 | | |
| 36 | X1=1,X2=1,X3=1,X4=2,X5=3 | 82 | X1=1,X2=2,X3=1,X4=2,X5=1 | | |
| 37 | X1=2,X2=2,X3=3,X4=1,X5=3 | 83 | X1=2,X2=1,X3=1,X4=2,X5=1 | | |
| 38 | X1=1,X2=2,X3=3,X4=1,X5=3 | 84 | X1=1,X2=1,X3=1,X4=2,X5=1 | | |
| 39 | X1=2,X2=1,X3=3,X4=1,X5=3 | 85 | X1=2,X2=2,X3=3,X4=1,X5=1 | | |
| 40 | X1=1,X2=1,X3=3,X4=1,X5=3 | 86 | X1=1,X2=2,X3=3,X4=1,X5=1 | | |
| 41 | X1=2,X2=2,X3=2,X4=1,X5=3 | 87 | X1=2,X2=1,X3=3,X4=1,X5=1 | | |
| 42 | X1=1,X2=2,X3=2,X4=1,X5=3 | 88 | X1=1,X2=1,X3=3,X4=1,X5=1 | | |
| 43 | X1=2,X2=1,X3=2,X4=1,X5=3 | 89 | X1=2,X2=2,X3=2,X4=1,X5=1 | | |
| 44 | X1=1,X2=1,X3=2,X4=1,X5=3 | 90 | X1=1,X2=2,X3=2,X4=1,X5=1 | | |
| 45 | X1=2,X2=2,X3=1,X4=1,X5=3 | | | | |
| 46 | X1=1,X2=2,X3=1,X4=1,X5=3 | | | | |