

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL MECÂNICA**

**ALLISON MINEO ZIANI**

**EDER FERNANDES**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NO  
ACABAMENTO SUPERFICIAL DE AÇOS (SAE 1020 E SAE 1045), NO  
PROCESSO DE TORNEAMENTO UTILIZANDO ANALISE DE  
VARIÂNCIA (ANOVA)**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2016**

**ALLISON MINEO ZIANI**

**EDER FERNANDES**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NO  
ACABAMENTO SUPERFICIAL DE AÇOS (SAE 1020 E SAE 1045), NO  
PROCESSO DE TORNEAMENTO UTILIZANDO ANALISE DE  
VARIÂNCIA (ANOVA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao programa de graduação em Tecnologia em Manutenção Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná com requisito parcial para obtenção da graduação de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Mestre Marcos Gonçalves Junior

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2016**



---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Eder Fernandes, "Análise da Influência dos parâmetros de usinagem no acabamento superficial de aços (SAE 1020 e SAE1045), no processo de torneamento utilizando análise de variância (ANOVA)".**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 20:00hs do dia 30/06/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo Mecânico no programa de Graduação em Tecnologia em manutenção Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Mestre Marcos Gonçalves Junior - Presidente (Orientador)

Professor Carlos De Nardi - (Membro)

Professor Rafael Andrade Pasqual Pons - (Membro)

*“Não sei o que possa parecer aos olhos do mundo,  
mas aos meus pareço apenas ter sido como um  
menino brincando à beira-mar, divertindo-me com o  
fato de encontrar de vez em quando um seixo mais  
liso ou uma concha mais bonita que o normal,  
enquanto o grande oceano da verdade permanece  
completamente por descobrir à minha frente.”*

*Isaac Newton*

Eu, Allison, dedico este trabalho aos meus pais, Paulo e Fátima, que me deram toda a base para alcançar meus sonhos e objetivos, e dedico à minha noiva, Aline, que sempre esteve ao meu lado nos momentos mais importantes da minha vida.

Todo trabalho e projeto de minha vida, eu Eder não seria nada se não fosse pela grandiosa misericórdia de DEUS, manifesta em seu filho JESUS, então por mais essa etapa concluída em minha vida eu expresso minha dedicatória através desta escrita a ele. Também agradeço aos meus pais Antonio e Eunice que suportaram várias vezes meu estresse acumulado por noites de sono sem dormir estudando e também com as dificuldades na empresa.

## **AGRADECIMENTOS**

### **Expresso meus agradecimentos:**

Eu, Allison, primeiramente, agradeço à Deus, por sempre guiar meu caminho e estar ao meu lado para que eu consiga enfrentar as dificuldades da minha vida e saber aproveitar os bons momentos.

Também agradeço ao apoio e companheirismo da minha família, especialmente dos meus pais. Agradeço à minha noiva por sempre participar dos momentos mais importantes e cruciais da minha vida.

Por fim, agradeço a todos meus amigos, professores e servidores da UTFPR – Cornélio Procópio, especialmente, meu orientador, Marcos Gonçalves, por me ajudar nesse ano de ensino superior e na jornada deste trabalho

Eu Eder agradeço aos meus amigos que aprendi a amar como irmãos no decorrer do curso Áureo Jhonata, André Pastre, Daniele Oliveira e Geniel Soares não esquecendo também dos professores que sempre me motivaram a prosseguir Fernando Diorio, Carlos de Nardi, Carlos Elias, Adailton e Adriano Borges, e Roberto Molina o qual foi um grande colaborador no entendimento da estatística aplicada neste trabalho. Ao colaborador do grupo Iguaçu, Rinaldo o qual foi um conselheiro na prática do torneamento e materiais aplicados.

## RESUMO

ZIANI, Allison Mineo; FERNANDES, Eder. **Análise da Influência dos Parâmetros de Usinagem no Acabamento Superficial de Aços (SAE 1020 e SAE 1045), no Processo de Torneamento Utilizando Análise de Variância (anova)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Tecnologia em Manutenção Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

O processo de usinagem é muito utilizado nos setores industriais pelo simples fato de possuírem a finalidade de darem o acabamento em uma peça e formas geométricas definidas a uma matéria prima e com isso obter-se o produto final desejado. A qualidade superficial do material processado não depende apenas da usinagem em si, mas também de parâmetros e variáveis como: ferramentas utilizadas, material que será usinado, aplicação de refrigerante, bem como seleção de velocidade de corte avanço, entre outros. Para isso, é necessário realizar todo um planejamento para definir a forma e aparência da peça, materiais e insertos apropriados para elas, forma geométrica, enfim, realizar um projeto sobre aquilo que se deseja respeitando as limitações das variáveis aplicadas, o que faz desta etapa muito importante para que não haja desperdícios de processo e nem desgaste desnecessário das ferramentas utilizadas. Portanto, este trabalho tem a finalidade de analisar o acabamento de aços SAE 1020 e SAE 1045, variando alguns parâmetros de usinagem, como rotação, avanço, e profundidade de corte, bem como variáveis que são pastilhas intercambiáveis de diferentes revestimentos e processo de obtenção de revestidos a vapor, fluido de corte, e ainda material a ser usinado. Propor uma análise estatística dos resultados calculando os valores de variáveis envolvidas no torneamento usando análise de variância (ANOVA).

**Palavras-chave:** Usinagem. Pastilhas. Fluido de Corte. SAE 1020. SAE 1045. Rugosidade. Análise de Variância

## ABSTRACT

ZIANI, Allison Mineo; FERNANDES, Eder. **Influence Analysis of Machining Parameters on Surface Workmanship Steels SAE 1020 and SAE 1045, the Turning Process Using Analysis of Variance.** Undergraduate Thesis (Graduation) - Technology in Industrial Maintenance. Federal Technological University of Paraná. Cornelio Prociópio, 2016.

The machining process is widely used in industry for the simple fact of having a purpose of giving finish in one workpiece and define geometric shapes to a raw material and therefore, obtain the desired product. The processed material surface quality depends not only on machining itself, but also parameters and variables such as tools used, the material that will be machined, coolers application and also cutting speed progress selection, among others. For that, is needed to perform a planning to define the shape and appearance of a workpiece, suitable materials and appropriate inserts to them, geometric shape. Thus, to accomplish a project on what you want while respecting the applied variables limitations, which makes this step very important that there be no waste of process or unnecessary tools damage. Therefore, this work is intended o analyze the SAE 1020 and SAE 1045 steel finish, varying some machining parameters such as rotation, advance and depth cut as well as variables that are indexable inserts of different coatings and obtaining process coated steam, cutting fluid, and even material to be machined. Propose a statistical analysis by calculating the values of involved variables in turning using analysis of variance (ANOVA).

**Keywords:** Machining. Pastilles. Cutting Fluid. SAE 1020 SAE 1045 Roughness. Analysis of Variance.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do movimento de corte e suas decomposições.....	30
Figura 2 - Representação da geometria de uma cunha.....	34
Figura 3 - Classificação dos fluidos de corte.....	46
Figura 4 - Adaptação da figura 9.1, classificação de integridade superficial.....	54
Figura 5 – Parâmetros de medida para Ra.....	57
Figura 6 – Parâmetros de medida da rugosidade.....	60
Figura 7 – Gráfico de variância dentro da média.....	64
Figura 8 – Gráfico de variância fora da média.....	65
Figura 9 - Detalhes do suporte MWLNR.....	71
Figura 10 – Torno Nardini Ms 205.....	73
Figura 11 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1020 com f de 0,117 mm.....	80
Figura 12 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1020 com f de 0,125 mm.....	82
Figura 13 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1020 com f de 0,151 mm.....	84
Figura 14 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1045 com f de 0,117 mm.....	86
Figura 15 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1045 com f de 0,125 mm.....	88
Figura 16 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1045 com f de 0,151 mm.....	90
Figura 17 - Média de rugosidade por amostras.....	91
Figura 18 - Rugosidade Ra com os respectivos avanços.....	92
Figura 19 - Rugosidade Rq com os respectivos avanços.....	92
Figura 20 - Média de rugosidade por amostras.....	93
Figura 21 - Rugosidade Ra com os respectivos avanços.....	94
Figura 22 - Rugosidade Rq com os respectivos avanços.....	94
Figura 23 - Rugosidade Rq com os respectivos avanços.....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vida da ferramenta.....	44
Tabela 2 - Modelo de tabela anova para Excel.....	66
Tabela 3 - Parâmetros de usinagem conforme o material empregado.....	95
Tabela 4 - Combinações entre grupos de variáveis em conformidade com ANOVA...	97
Tabela 5 - Rugosidades Ra e Rq dos aços SAE 1020 e SAE 1045 e grupos de variáveis.....	98
Tabela 6 - média e desvio padrão (D.P.) para Ra e Rq segundo ferramenta, fluido e material.....	99
Tabela 7 - ANOVA para rugosidade Ra.....	100
Tabela 8 - ANOVA para rugosidade Rq.....	100
Tabela 9 - Tabela de ANOVA para Ra.....	101
Tabela 10 - Comparações de Ra segundo fluido.....	102
Tabela 11 - Comparações de Ra segundo ferramenta com material fixo independente de fluido.....	102
Tabela 12 - Comparações de Ra segundo material com ferramenta fixa independente de fluido.....	103
Tabela 13 - Comparações de Ra segundo material com ferramenta e fluido fixos.....	103
Tabela 14 - Tabela de anova para Rq.....	104
Tabela 15 - Comparações de Rq segundo fluido.....	104
Tabela 16 - Comparações de Rq segundo fluido com ferramenta fixa independente de material.....	105
Tabela 17 - Comparações de Rq segundo ferramenta com material fixo independente de fluido.....	105
Tabela 18 - Comparações de Rq segundo material com ferramenta fixa independente de fluido.....	106
Tabela 19 - Comparações de Rq segundo fluido com material fixo independente de ferramenta.....	106
Tabela 20 - Comparações de Rq segundo ferramenta com material e fluido fixos.....	106
Tabela 21 - Comparações de Rq segundo material com ferramenta e fluido fixos.....	107
Tabela 22 - Resumo e adaptação de dados Ra, para anova de fator único.....	108

Tabela 23 - Resumo e adaptação de dados $R_q$ , para anova de fator único.....	108
Tabela 24 - Superioridade da relação de aplicação de fluido.....	116

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - média de rugosidade Ra (aço SAE 1020).....	109
Gráfico 2 - média de rugosidade Rq (aço SAE 1020).....	110
Gráfico 3 - média de rugosidade Ra (aço SAE 1045).....	110
Gráfico 4 - média de rugosidade Rq (aço SAE 1045).....	111
Gráfico 5 - Relação entre materiais diferentes analisando com parâmetro Ra.....	113
Gráfico 6 - Relação entre materiais diferentes analisando com parâmetro Rq.....	113
Gráfico 7 - Relação entre aplicação de fluido analisando com parâmetro Ra.....	114
Gráfico 8 - Relação entre aplicação de fluido analisando com parâmetro Rq.....	115
Gráfico 9 - Relação entre troca de ferramentas analisando com parâmetro Ra.....	116
Gráfico 10 - Relação entre troca de ferramentas analisando com parâmetro Rq.....	117
Gráfico 11 - Relação entre materiais.....	118
Gráfico 12 - Relação entre fluido.....	118
Gráfico 13 - Relação entre ferramenta.....	119
Gráfico 14 - Relação entre materiais.....	119
Gráfico 15 - Relação entre fluido.....	120
Gráfico 16 - Relação entre ferramenta.....	120
Gráfico 17 - Soma das relações com os melhores grupos de variáveis comparando por parâmetros de rugosidade.....	121

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição química do aço SAE 1020.....	49
Quadro 2 - Composição química do aço SAE 1045.....	51
Quadro 3 - Alguns parâmetros de rugosidade.....	56
Quadro 4 - Modelo de cruzamento de parâmetros.....	75
Quadro 5 - Seleção dos melhores resultados.....	77
Quadro 6 - Acabamentos que foram satisfatórios para análise quantitativa.....	78
Quadro 7 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1020 com f de 0,117 mm.....	79
Quadro 8 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1020 com f de 0,125 mm.....	81
Quadro 9 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1020 com f de 0,151 mm.....	83
Quadro 10 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1045 com f de 0,117 mm.....	85
Quadro 11 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1045 com f de 0,125 mm.....	87
Quadro 12 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1045 com f de 0,151 mm.....	89
Quadro 13 - Características do Inserto WNMG 060404 – TF IC807.....	69
Quadro 14 - Características do inserto WNMG 060404 I – PP IC8250.....	70
Quadro 15 - Dimensões do suporte MWLNR em (mm).....	71

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fluxograma 1 - Variáveis de parâmetro.....	74
Fluxograma 2 - Fluxograma de processos de usinagem, definição de parâmetros...	76

## LISTA DE SIMBOLOS

$V_c$  – Velocidade de corte;

$\pi$  – Constante pí;

$d$  – Diâmetro;

$\eta$  - Rotação;

$m$  – Metros;

$mm$  – Milímetros;

$v_f$  – Velocidade de avanço;

$f$  – Avanço;

$min$  – Minutos;

$t_c$  – Tempo de corte;

$l_f$  – Distância percorrida.

Mn – Manganês;

Si – Silício;

Ni – Níquel;

Cr – Cromo;

Co – Cobalto;

$Fe_3C$  – Carboneto de ferro;

V – Vanádio;

W – Tungstênio;

Mo – Molibdênio;

$Cr_7C_3$  - Carboneto de cromo;

$Cr_{23}C_6$  – Carboneto de cromo;

$\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$  – Carboneto de tungstênio;

$\text{Fe}_4\text{Mo}_2\text{C}$  – Carboneto de molibdênio;

$^{\circ}\text{C}$  – Celsius;

TiN – Nitreto de titânio;

TiAlN - Nitreto de titânio-alumínio;

TiAlCrN - Nitreto de titânio alumínio e cromo;

TiC – Carboneto de titânio;

TiCN – Carbonitreto de titânio;

Al – Alumínio;

$\text{Mo}_2\text{C}$  – Carbeto de molibdênio;

TaC – Carboneto de tântalo;

NbC – Carbeto de nióbio;

WC – Carboneto de tungstênio;

AlN – Nitreto de alumínio;

TaN – Nitreto de tântalo;

$\text{Al}_3\text{O}_3$  – Oxido de alumínio;

$\text{Si}_3\text{N}_4$  – Nitreto de silício;

$a_p$  – Profundidade de corte;

$R_a$  – Desvio aritmético médio;

$\mu\text{m}$  – Micro-métro;

$R_q$  – Desvio médio quadrático;

$R_t$  – Rugosidade total;

$r_{\varepsilon}$  – Raio da ferramenta;

$f^2$  - Avanço ao quadrado;



$l_v$  – Percurso inicial;

$l_m$  – Percurso de medição;

$l_e$  – Comprimento de amostragem;

$l_n$  – Percurso final;

$l_t$  – Percurso de apalpamento;

$Y_{ij}$  - É a observação do  $i$ -ésimo tratamento na  $j$ -ésima unidade experimental;

$\mu$  - Médias;

$\tau_i$  - Efeito do  $i$ -ésimo tratamento;

$\epsilon_{ij}$  - erro associado ao  $i$ -ésimo tratamento na  $j$ -ésima unidade experimental;

$H_0$  – Hipótese nula;

$H_1$  – Hipótese não nula;

$\frac{m}{mm}$  – Metro por milímetro;

$\frac{mm}{min}$  – Milímetro por minuto;

$\frac{m}{min}$  – Metro por minuto;

m/min – Metro por minuto;

mm/volta – Milímetro por volta;

P – Fosforo;

S – Enxofre;

$SS_A$  – Soma dos quadrados entre grupos;

$n$  – Numero de repetições;

$\Sigma$  – Somatório;

$k$  – População;

$MS_A$  – Soma média dos quadrados;

$MS_E$  – Soma média dos quadrados dentro do grupo;

$SS_T$  – Soma dos quadrados total;

$S_T$  – Quantil de probabilidade;

$\alpha$  – Significância;

rpm – Rotações por minuto;

$H_p$  – Potencia;

$\Phi$  – Diâmetro;

$h$  – Altura;

$B$  – Base;

$l_1$  – Comprimento;

$l_2$  – Largura.

## LISTA DE SIGLAS

CNC – Comando numérico computadorizado;

NBR – Norma brasileira;

ABNT – Associação brasileira de normas técnicas;

HSS – Aço-Rápido;

GC – Metal duro com cobertura;

CT – Cerment;

CC – Metal cerâmico;

PCD – Diamante policristalino;

CVD – Deposição química a vapor;

PVD – Deposição física a vapor;

CBN – Nitreto de boro cubico;

CFC – Cristal cubico de face centrada;

GGD – Gerdal;

APC – Aresta postiça de corte;

SQ – Soma quadrática;

GI – Graus de liberdade;

MQ – Média quadrática;

D.P. – Desvio padrão;

G.L. – Graus de liberdade;

DMS – Diferença mínima significativa.

## LISTA DE ACRÔNIMOS

SAE - Society of Automotive Engineers;  
AISI - American Iron and Steel Institute;  
ISO – International Organization for Standardization;  
HB – Hard Brinell;  
HV – Hard Vickers;  
DIN - Deutsches Institut für Normung;  
JIS - Japanese Institute for Standards;  
ANOVA – Analisy of variance;  
DMS – Diferença Mínima Significativa;  
TRS – Transverse Rupture Strength;  
HRA – Hardness.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>24</b>
1.1 OBJETIVOS .....	26
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	26
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>27</b>
2.1 PROCESSO DE USINAGEM.....	27
2.1.1 O processo de torneamento .....	28
2.1.1.1 Trajetórias da ferramenta no torneamento .....	28
2.1.1.2 Movimentos na usinagem.....	29
2.1.2 Cálculos básicos envolvidos no torneamento e na usinagem .....	31
2.1.2.1 Calculo da velocidade de corte .....	31
2.1.2.2 Calculo da velocidade de avanço .....	31
2.1.2.3 Cálculo do tempo de corte para tempos ativos .....	32
2.1.2.4 Calculo para tempo passivos .....	32
2.1.3 Geometria da ferramenta .....	32
2.2 FERRAMENTAS .....	34
2.2.1 Processo de Revestimento PVD .....	36
2.2.2 Processo de Revestimento CVD .....	36
2.2.3 Aços-rápidos (HSS).....	37
2.2.4 Aços-rápidos com cobertura.....	38
2.2.5 Metal duro .....	38
2.2.6 Metal duro com cobertura (GC) .....	39
2.2.7 Cermet (CT) .....	40
2.2.8 Material cerâmico (CC).....	40
2.2.9 CBN (nitreto de boro cubico) .....	41
2.2.10 Diamante Policristalino (PCD) .....	41
2.3 DESGASTE DAS FERRAMENTAS .....	42
2.3.1 Fatores que influenciam no desgaste das ferramentas .....	43
2.3.1.1 Condições de usinagem .....	43
2.3.1.2 Geometria da ferramenta .....	44
2.4 FLUIDO DE CORTE .....	45

2.4.1 Funções dos fluidos de corte.....	45
2.4.2 Classificação dos fluidos de corte .....	46
2.4.2.1 Aquosos.....	46
2.4.2.2 Óleos.....	47
2.4.3 Seleção do fluido de corte .....	47
2.5 AÇOS .....	47
2.5.1 Classificação dos aços.....	48
2.5.2 Usinabilidade dos metais.....	49
2.5.3 Aço SAE 1020 .....	49
2.5.3.1 Aplicações .....	50
2.5.3.2 Forjamento .....	50
2.5.3.3 Tratamento Térmico .....	50
2.5.4 Aço SAE 1045 .....	51
2.5.4.1 Aplicações .....	52
2.5.4.2 Forjamento .....	52
2.5.4.3 Tratamento Térmico .....	52
2.6 INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	53
2.6.1 Rugosidade .....	55
2.6.1.1 Quantificação da rugosidade.....	55
2.6.1.2 Calculo de rugosidade no torneamento.....	57
2.6.1.3 Efeitos de parâmetros de usinagem na rugosidade .....	58
2.6.1.4 Medição da rugosidade .....	59
2.6 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	60
2.7.1 Introdução a análise de variância (ANOVA).....	61
2.7.2 Conceitos básicos .....	62
2.7.2.1 Tratamento .....	62
2.7.2.2 Unidade experimental.....	62
2.7.2.3 Repetição .....	62
2.7.2.4 Variável resposta.....	63
2.7.2.5 Delineamento experimental .....	63
2.7.2.6 Modelo e análise de variância .....	63
2.7.3 Experimentação subsequente com teste <i>Tukey</i> (múltiplas comparações).....	66
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>68</b>

3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	68
3.2 FERRAMENTAS .....	69
3.3 MATERIAL.....	71
3.4 FLUIDO DE CORTE .....	72
3.5 ENSAIO DE USINAGEM .....	72
3.5.1 Metodologia dos Ensaio finais .....	73
3.5.2 Ensaio Preliminar, Comparando as Melhores Condições .....	75
3.5.2.1 Seleção Definitiva dos Parâmetros de Usinagem .....	90
3.5.2.2 Análise Para Aço SAE 1020 .....	91
3.5.2.3 Análise Para o Aço SAE 1045.....	93
3.5.2.4 Conclusão da Análise Preliminar.....	95
3.5.3 Equipamento de Metodologia de Medição .....	96
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>97</b>
4.1 MONTAGEM DA TABELA ANOVA PARA SEQUÊNCIA DE USINAGEM .....	97
4.1.2 Tratamento de dados utilizando softwares .....	99
4.1.3 Análise de dados utilizando Excel .....	107
4.2 RESULTADOS GRÁFICOS DE RUGOSIDADE .....	109
4.3 RESULTADOS DAS RELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS.....	112
4.3.1 Variação de material.....	113
4.3.2 Variação entre aplicação de fluido .....	114
4.3.3 Variação do revestimento da ferramenta.....	116
4.3.4 Avaliando os resultados entre grupos com três variáveis .....	117
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>122</b>
<b>REFERÊNCIA.....</b>	<b>124</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>126</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com todo o avanço tecnológico empregado atualmente na área de usinagem, máquinas e ferramentas são produzidos de forma constante para o suprimento deste processo e tornando-se de extrema importância para área da mecânica que a cada avanço na tecnologia dedica-se a produzir peças mais precisas e complexas. Considerando o torneamento como referência na comparação entre a interação máquina e homem, as falhas e erros na produção de peças, que exigem um maior rigor em tolerância de dimensões e acabamentos, podem ser muito além do desejado gerando com isto desperdícios involuntários de matéria prima e conseqüentemente gastos não planejados no processo produtivo.

A modernização da usinagem trouxe grandes benefícios com a invenção dos tornos CNCs, isto causou um imenso avanço para área contando com um ótimo acabamento superficial ao final da produção, automatização de movimentos, produção de peças com dimensões diversas e mais complexas, etc. porém exige-se do profissional maior nível de conhecimento e maior investimentos com equipamento e ferramental, portanto esta modernização restringe-se para muitas categorias de empresas, além do equipamento não ser viável para ser utilizado na usinagem em revolução, assim neste quesito o torno ainda se sobressai ao ser comparado a produção de peças com perfis redondo e o corte efetuado no eixo longitudinal da peça, característica não proporcionada pelo fato do CNC possuir o movimento na matriz da ferramenta de corte que são constituídas de fresas e brocas especiais, o que no torno a rotação é dada pela placa com a peça fixa e ferramentas não geram movimento de rotação.

A rugosidade conceitualmente dizendo são as irregularidades constituídas na superfície das peças e objetos, encontrados nelas tanto em sua forma natural como também após processos industriais. Todo material por mais perfeito que seja possui saliências e reentrâncias em suas superfícies e se apresentam com espaçamentos regulares ou irregulares tendendo a formar um padrão ou textura característicos em sua superfície vista de forma ampliada.



Segundo Ferraresi (1977), verifica-se experimentalmente que materiais manufaturados nas mesmas condições de usinagem, com a mesma ferramenta e máquina operatriz, apresentam rugosidades superficiais diferentes.

Diz Machado et al. (2011), que de fato, a rugosidade de uma superfície depende de vários parâmetros, como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, e operação de usinagem.

Alguns fatores que podem influenciar no acabamento superficial são vistos e estudados diretamente no processo de usinagem de maneira comparativa: raio da aresta de corte, origem da aresta postiça, vibração entre ferramenta e peça, desgaste da ferramenta, aplicação de óleo, entre outras. Já outros fenômenos do processo de usinagem não são analisados de maneira simples, porque integram comportamentos e funções microscópicas da produção, sendo necessário um estudo mais complexo e aprofundado de toda esfera da usinagem, bem como o processo no geral.

O acabamento dos materiais usinados, que são especificados em projetos mecânicos, considerando a particularidade da aplicação de cada peça fabricada, adquire características como: tolerância, resistência a corrosão, resistência a fadiga, escoamento de fluidos, lubrificação e transmissão de calor e um bom acabamento superficial também se torna essencial onde houver solicitações mecânicas ou físicas sobre as superfícies das peças. Estas propriedades adquiridas divergem de um para outro procedimento adotado na usinagem. Segundo Machado et al. (2011), uma rugosidade baixa é essencial em superfícies de mancais, superfícies que requerem pintura, superfícies que servirão de escoamento de fluidos e gases, superfícies cujo visual exige brilho e superfícies que devem refletir raios e luzes, portanto com um controle e padronização dos métodos aplicados ao processo acredita-se que podem ser melhorados os resultados no acabamento superficial dos materiais.

## 1.1 OBJETIVOS

Entendendo que a busca por uma melhor perfeição em acabamento superficial de uma peça é primordial na área da mecânica e de processos de fabricação mecânica de forma geral, a finalidade deste trabalho é analisar e comparar alguns parâmetros de usinagem como: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, bem como a mudança de variáveis do processo, sendo: aplicação de fluido e troca de pastilha intercambiável na usinagem dos aços SAE 1020 e SAE 1045, procurando com isto adquirir melhores resultados no acabamento superficial dos materiais em destaque. Propõe-se usar medição da rugosidade pelo rugosímetro e posteriormente analisando de forma teórica e prática os dados coletados por amostras torneadas em laboratório e transformar em informações que seja útil para pesquisas ou estudos mais aprofundados sobre o assunto proposto e também conferir quais os melhores parâmetros a serem empregados na usinagem dos materiais especificados, entendendo que a finalidade está voltada para o acabamento.

## 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Para adquirir confiança maior na metodologia empregada no trabalho, principalmente quando cita-se a coleta de dados e os tratamentos das variações que se aplicam à usinagem, tem-se como o objetivo específico tratar os ensaios que forem efetuados com testes estatísticos como análise de variâncias usando (ANOVA), e teste de múltiplas comparações usando (teste Tukey). Com isso objetiva-se agregar maior credibilidade nas afirmações sobre os melhores tratamentos aplicados no resultados final do trabalho.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 PROCESSO DE USINAGEM

O processo de usinagem é um dos mais utilizados no mundo, inserido no processo de fabricação, a usinagem tem como objetivo dar formas específicas e peculiares a cada peça projetada, dimensões diversas, etc. Atualmente com a tecnologia empregada podem ser produzidas diversas geometrias de peças e formas extremamente complexas.

Como a operação de usinagem entende-se aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação de qualquer um desses três itens, produzem cavaco. Define-se cavaco, a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular. Além desta característica, estão envolvidos no mecanismo de formação do cavaco alguns fenômenos particulares, tais como o recalque, a aresta postiça de corte, a craterização na superfície de saída da ferramenta e a formação periódica do cavaco (dentro de determinado campo de variação da velocidade de corte). (Ferraresi, Dino, 1924).

A usinagem subdivide-se em vários outros processos e todos os processos por sua vez também podem ser divididos em desbastes e acabamento, onde um se preocupa com a remoção do material e o outro com a qualidade final do produto. Alguns dos processos mais utilizados na área da usinagem são portanto:

- **Torneamento:** quando a peça gira em torno do seu eixo enquanto a ferramenta permanece realizando os movimentos de corte entre outros;
- **Furação:** aqui a ferramenta gira com movimento de avanço enquanto a peça permanece fixa, podendo ser manual ou automática;
- **Fresamento:** a ferramenta gira neste processo enquanto a peça presa gera os movimentos de avanço;
- **Mandrilamento:** a ferramenta é dotada de dos movimentos de corte e avanço, enquanto a peça permanece estática;
- **Brochamento:** a ferramenta é tracionada e a passagem dos dentes sucessivos provoca mudança de forma;

- **Roscamento:** processo diversificado podendo ser efetuado manual ou por máquinas, roscas externas podem ser produzidas por cossinetes, já roscas internas são feitas utilizando macho ou ferramentas de perfil único ou múltiplo.

### 2.1.1 O processo de torneamento

Segundo Ferraresi (1977), torneamento é o processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes e multicortantes. Portanto, a peça deve girar em torno do eixo principal da mesa em que está fixado o tarugo, permitindo que a ferramenta se desloque de forma simultânea seguindo uma trajetória em um mesmo plano ao eixo.

O conceito do torneamento acontece de forma prática quando há a remoção de cavaco do tarugo (peça de trabalho) durante o processo de usinagem. O cavaco é removido por ferramenta cortante de um gume somente e com propriedade de dureza maior o que a da peça em trabalho.

#### 2.1.1.1 Trajetórias da ferramenta no torneamento

- A. Torneamento retilíneo – é a forma de torneamento em que o processo de corte da ferramenta segue uma trajetória retilínea e se subdivide em:
- **Torneamento cilíndrico** – neste tipo a ferramenta segue uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação e pode ser tanto na superfície externa quanto interna do tarugo. E quando o objetivo é fornecer um entalhe circular na face do tarugo, perpendicular ao eixo de rotação a denominação do torneamento é sangramento axial;
  - **Torneamento cônico** – trajetória retilínea da ferramenta com um ângulo em relação ao eixo principal de rotação da máquina, também pode ser interna ou externa a superfície usinada;

- **Torneamento radial** – trajetória efetuada perpendicular ao eixo principal de rotação e que quando se objetiva um entalhamento circular denomina-se sangramento radial e ainda quando visa uma superfície plana, sendo denominada torneamento de faceamento;
  - **Perfilhamento** – trajetória retilínea que é efetuada tanto radial quanto axial, visando a obtenção de uma forma específica determinada pelo perfil da ferramenta.
- B. Torneamento curvilíneo – trajetória na qual a ferramenta se desloca de forma curvilínea, ou seja, os movimentos transmitidos pela ferramenta neste torneamento sempre estão efetuando uma trajetória obedecendo um raio específico em relação ao eixo principal do torno.

#### 2.1.1.2 Movimentos na usinagem

Os movimentos agregados ao processo de usinagem são generalizados em qualquer procedimento desde o torneamento a uma simples furação. Estes movimentos são responsáveis por originar o processo de usinagem.

Diniz e Coppini (2008), afirmam por convenção que, os movimentos sempre estão ocorrendo e todos os movimentos sendo realizado pela ferramenta. Este procedimento permite padronizar sinais algébricos aos movimentos, sempre tendo como referência a peça.

Os movimentos podem ser classificados como ativos e passivos. Os ativos incluem aqueles que provocam a remoção de material, sendo os movimentos:

- **Movimento de corte:** ocorre entre ferramenta e peça que sem a ocorrência do avanço remove cavaco em uma única rotação;
- **Movimento de avanço:** entre ferramenta e peça e junto ao movimento de corte, possibilita a remoção de material contínua e durante várias rotações. No caso do aplainamento é de forma intermitente;
- **Movimento de penetração:** é o movimento que determina a profundidade de corte ao empurrar a ferramenta em direção ao interior

da peça e assim regular a profundidade do passe e a espessura do cavaco;

- **Movimento efetivo de corte:** entre ferramenta e peça a partir do qual se resulta o processo de usinagem. Sendo o avanço contínuo o efetivo é a resultante do movimento de corte e o avanço. E no aplainamento, o próprio movimento de corte é o efetivo.

A figura 1, ilustra a representação do movimento de corte e suas decomposições na usinagem.

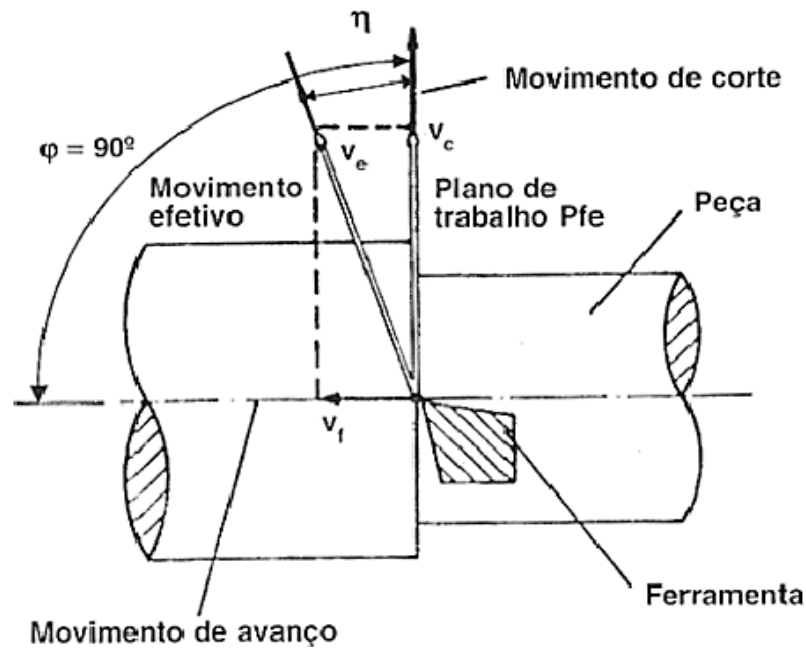


Figura 1 - Representação do Movimento de Corte e Suas Decomposições  
Fonte: Tecnologia da Usinagem dos Metais, Diniz e Coppini (2008).

Os movimentos passivos embora não promovam a remoção de cavacos, são considerados essenciais no processo de usinagem, apresentando os seguintes movimentos:

- **Movimento de ajuste:** entre ferramenta e peça, onde a camada a ser removida do material é pré-definida. Em alguns processos como furação e brochamento são inexistentes;

- **Movimento de correção:** entre ferramenta e peça, movimento que serve para compensar alterações ocorrentes do processo como deformação, dilatação térmica, ou desgaste da ferramenta;
- **Movimento de aproximação:** entre ferramenta e peça na qual é aproximada a ferramenta com a superfície da peça;
- **Movimento de recuo:** movimento entre ferramenta e peça que ocorre após a usinagem e que é contrário ao de aproximação.

## 2.1.2 Cálculos básicos envolvidos no torneamento e na usinagem

### 2.1.2.1 Calculo da velocidade de corte

Segundo Machado et al. (2011), velocidade de corte ( $V_c$ ) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte. Expressa pela equação:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot \eta}{1000} \cdot \left[ \frac{m}{mm} \right] \quad (1)$$

### 2.1.2.2 Calculo da velocidade de avanço

Segundo Diniz e Coppini (2008), a velocidade de avanço no torneamento é o produto do avanço pela rotação da ferramenta. Expressa pela equação:

$$v_f = f \cdot n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d} \cdot f \cdot \left[ \frac{mm}{min} \right] \quad (2)$$

### 2.1.2.3 Cálculo do tempo de corte para tempos ativos

Diniz e Coppini (2008), representa o tempo em que o movimento de avanço ou o de corte estão efetivamente ocorrendo.

$$t_c = \frac{l_f}{v_f} = \frac{l_f}{f \cdot n} = \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{1000 \cdot f \cdot v_c} \cdot \left[ \frac{m}{min} \right] \quad (3)$$

### 2.1.2.4 Calculo para tempo passivos

Nem sempre pode ser calculado por estar ligado mais a cronometragem dos tempos de movimentos, porém existem técnicas que estima-os estabelecendo os chamados tempos padrões. Esses tempos costumam os intervalos na colocação e fixação da peça; aproximação e posicionamento da ferramenta; corte; afastamento da ferramenta; inspeção e retirada da peça; preparo da máquina; remoção da ferramenta para sua substituição e recolocação e ajustagem da nova ferramenta.

### 2.1.3 Geometria da ferramenta

Todo material solido existente no universo possui sua dureza específica. Nos primórdios da existência humana, quando o antigo homem iniciou o processo de evolução dos materiais cortantes ou penetrantes, notou-se que um certo pedaço de pedra ou lasca de algum mineral, tinha a facilidade de cortar outro sem se desgastar, com essa descoberta o homem primitivo procurou aplicar-se em construir utensílios para caça e defesa própria e assim propôs a dar formas nestes materiais, muito mais adiante com a descoberta do aço essa formas ganharam geometrias bem menos robustas, ganhando assim aparência, gumes, arestas, poder maior de corte, enfim, geometrias distintas para cada finalidade de trabalho.

Na usinagem, embora o engenheiro conhecendo sobre muitos materiais e de uma gama enorme de processos para obtenção de ferramentas cortantes com



diversas durezas, para manter o processo evolutivo natural o homem ainda continua a procura de novos tipos de materiais e estruturas moleculares e cristalinas que se comportam melhor para cada finalidade de produção, o que com isto, algumas dessas ferramentas são produzidas em laboratórios e possuem um elevado custo de produção. Portanto, mesmo com características ótimas de materiais e durezas elevadas como ferramentas feitas de diamantes (CBN), todo tipo de ferramenta precisa de dimensões bem definidas, pois este é um dos principais fatores quando comentados na área da usinagem para a exigência de acabamento superficial satisfatório.

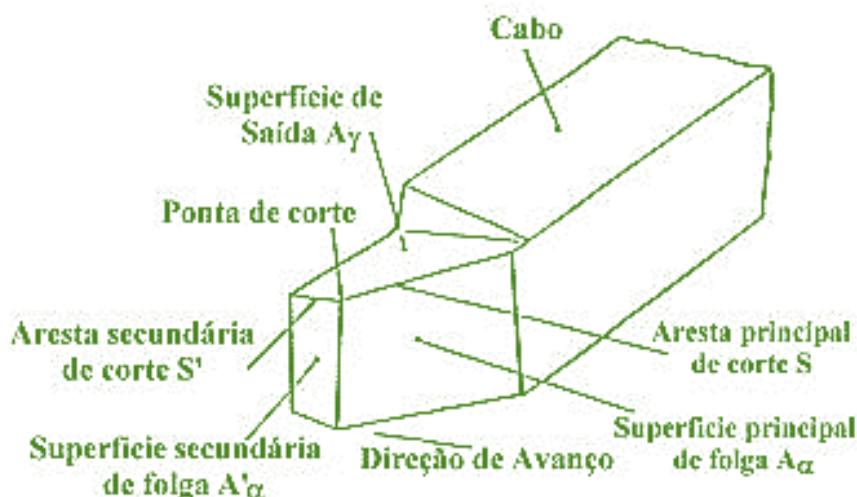
A geometria da ferramenta de corte exerce grande influência no desempenho da usinagem. Por melhor que seja o material da ferramenta, se a sua geometria não for preparada adequadamente, não haverá êxito na operação. Tão importante é a sua importância que se faz necessário normalizar, da maneira mais conveniente possível, os ângulos da cunha cortante para uniformizar a nomenclatura entre os profissionais e a literatura especializada. Como a norma brasileira *NBR 6163 – Conceitos da Técnica de Usinagem: Geometria da Cunha Cortante: Terminologia* (ABNT, 1980) trata desse assunto. (Machado, Alisson Rocha et al., 2011).

Segundo Ferraresi (1977), denomina-se cunha cortante (ou gume cortante) a parte da ferramenta na qual o cavaco se origina, através do movimento relativo entre ferramenta e peça.

A ferramenta divide-se em superfícies, arestas e pontas:

- **Superfície de folga:** são as superfícies da cunha cortante na qual defrontam com as superfícies de corte e também chamadas de superfícies de incidência;
- **Superfície de saída:** é a superfície da cunha cortante sobre aonde o cavaco se forma;
- **Aresta principal de corte:** é a aresta de corte cuja cunha de corte correspondente indica a direção de avanço no plano de trabalho;
- **Aresta lateral de corte:** aresta cuja cunha de corte correspondente não indica a direção de avanço no plano de trabalho;
- **Ponta de corte:** ponta na qual se encontram a aresta principal e a lateral de corte de uma mesma superfície de saída.

A figura 2 ilustra a representação da geometria de uma ferramenta de corte.



**Figura 2 - Representação da Geometria de Uma Cunha**  
**Fonte: Tecnologia da Usinagem dos Metais, Diniz e Coppini (2008).**

## 2.2 FERRAMENTAS

O homem foi em toda sua existência dotado de inteligência de tal forma que a cada século de evolução nos tornamos mais conhecedores do mundo e tudo o que nos envolve. Somos criaturas com limitações e um subsídio que utilizamos para a solução de nossos problemas, trabalhos, serviços e dificuldade em produzir algo projetado é a criação e obtenção de novas ferramentas que em sua aplicação geral nos fornecem maior força, formas diversas, e até ferramentas com capacidade de “calcular” por nós mais rapidamente, caso do computador.

A ferramenta foi um dos primeiros instrumentos a ser utilizados pelo homem, desde eras pré-históricas. Fossem feitas de pedra ou madeira, constituíam para o ser humano uma espécie de suplemento a força de suas mãos e de seus braços, de modo a permitir-lhe a realização de tarefas pacíficas – lavrar a terra, cortar e conformar substâncias úteis a sua vida – de modo mais eficiente e conferir-lhe maior segurança para defender-se contra o meio ambiente que lhe era, de modo geral, adverso. Com o tempo, foi aperfeiçoado a qualidade dos materiais utilizados na fabricação desses instrumentos, pela utilização de madeiras cada vez mais duras, pedras mais rijas e melhor afiadas, até atingir-se a idade dos metais, quando utilizou pela primeira vez o cobre e aprendeu, quase que instintivamente, a torna-lo mais duro pelo martelamento a frio. (Ferraresi, Dino, 1977, p. 277).

Para o alcance da remoção do cavaco dos materiais a ferramenta utilizada como corte necessita possuir a dureza maior que o da peça e sendo assim mecanicamente mais resistente. No contexto histórico da evolução das ferramentas pode ser observado que ferramentais produzidos a décadas atrás de aços que

quimicamente combinam facilmente ao carbono apresentavam desgastes muito rápido, portanto a produtividade dessas ferramentas se tornava baixa.

Na busca por melhora de produção a tecnologia procurou melhorar a composição dos materiais nas ferramentas e propondo-se a trabalhar no grande problema que tinham que solucionar e alcançar uma liga com tenacidade e dureza que são propriedades inversamente proporcionais até então nos materiais encontrados, porém com a combinação de vários elementos químicos, refinamento de grãos, controle do processo de fabricação e tratamento térmico, fabricantes conseguiram conciliar a pureza e qualidade dessa ferramentas e, assim, uma performance na usinagem dos materiais a uma velocidade de corte superior às de antes, permitindo velocidades superiores a 300 m/min.

Segundo Diniz e Coppini (2008), alguns critérios devem ser obedecidos para a seleção da ferramenta a ser utilizada na usinagem:

- **Material a ser usinado;**
- **Processo de usinagem;**
- **Condições da máquina operatriz;**
- **Forma e dimensões da ferramenta;**
- **Custo do material da ferramenta;**
- **Condições de usinagem;**
- **Condições da operação.**

Sendo qual forem os materiais de ferramentas em questão, as principais características que devem apresentar em função dos tópicos citados acima são:

- **Elevada dureza;**
- **Tenacidade para evitar fratura;**
- **Elevada resistência ao desgaste;**
- **Alta resistência à compressão;**
- **Alta resistência ao cisalhamento;**
- **Boa propriedade mecânica em temperatura elevada;**
- **Elevada resistência ao choque térmico;**
- **Resistência ao impacto;**
- **Inerte quimicamente.**

Para Diniz e Coppini (2008), não existe uma classificação geral de materiais para ferramentas. E ainda Ferraresi (1977), esclarece que em vista da ordem cronológica do seu desenvolvimento e com base nas suas características químicas, agrupam-se:

- **Aços-rápidos (HSS);**
- **Aços-rápidos com cobertura;**
- **Metal duro;**
- **Metal duro com cobertura (GC);**
- **Cerment (CT);**
- **Material cerâmico (CC);**
- **CBN (nitreto de boro cubico);**
- **Diamante Policristalino (PCD).**

#### 2.2.1 Processo de Revestimento PVD

O processo para obtenção de um revestimento PVD (*Physical Vapor Deposition*), consiste numa técnica de deposição de finas camadas de material podendo ser cerâmicos ou metálicos através de vaporização desses materiais em câmaras especialmente criadas para este fim. O processamento é feito em alto vácuo e temperaturas que variam de 150° e 500 °C.

O material utilizado para o revestimento é evaporado por calor, paralelamente é introduzido um gás reativo que forma um composto com o vapor do material, com isto este vapor com composto metálico e o gás se depositam na superfície das ferramentas criando um fino revestimento e altamente aderente.

#### 2.2.2 Processo de Revestimento CVD

O processo para obtenção do revestimento em CVD (*Chemical Vapor Deposition*), é efetuado depositando material solido mediante uma face gasosa,

similar ao PVD, porém para a deposição física o material de revestimento é sólido já na deposição química o substrato é enviado em um reator recebendo alimentação de gases, tendo como princípio de formação do revestimento a reação química ocorrida entre estes gases, o produto da reação é a obtenção de um material sólido que condensa nas superfícies do reator e assim formando a película de revestimento desejada.

### 2.2.3 Aços-rápidos (HSS)

Como descreve Diniz e Coppini (2008), o aço rápido é um aço ferramenta de alta liga de tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio, assim designado, pois quando do seu desenvolvimento, em 1905, era o material de ferramenta que suportava as maiores velocidades de corte.

Como se sabe, no estado recozido, os aços são constituídos de ferrita e carbonetos. A ferrita é a forma alotrópica alfa do ferro, podendo manter em solução ou não determinados elementos de liga. Nos aços-carbono comuns, a ferrita é praticamente constituída de 100% de ferro, mas nos aços-liga ela pode conter em solução Mn, Si, Ni, Cr e Co. Por seu turno, o carboneto pode ser simplesmente a cementita –  $\text{Fe}_3\text{C}$  – ou esta mesma cementita contendo alguns dos elementos formadores de carbonetos (Cr, V, W e Mo) em solução ou pode ser um ou vários carbonetos de liga, tais como  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{V}_4\text{C}_3$ ,  $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ ,  $\text{Fe}_4\text{Mo}_2\text{C}$ . (Ferraresi, Dino, 1977, p. 296).

Segundo Machado et al., (2011), a limitação dos aços com estrutura martensítica é que eles perdem dureza quando alcançam uma temperatura de revenido, ou seja, faixa de 300 °C a 600 °C.

Referente a norma americana para classificação dos aços-rápido, AISI – *American Iron and Steel Institute*, os aços são agrupados em seis classes, sendo:

- **Dos 610 – ao tungstênio;**
- **Dos 620 – ao tungstênio-cobalto;**
- **Dos 630 – ao molibdênio;**
- **Dos 640 – ao molibdênio-cobalto;**
- **Dos 650 – ao tungstênio-molibdênio;**
- **Dos 660 – ao tungstênio-molibdênio-cobalto.**

#### 2.2.4 Aços-rápidos com cobertura

Segundo Machado et al. (2011), em relação às coberturas, cada vez mais se desenvolvem novos revestimentos ou novas técnicas de deposição que garantem o oferecimento de ferramentas mais produtivas.

Para Diniz e Coppini (2008), comentam que a aplicação em escala industrial de revestimentos de nitreto de titânio (TiN), em ferramentas de usinagem começou na década de 1960 quando, por meio do processo CVD, começou-se a revestir ferramentas de metais duros.

A presença de cobertura na ferramenta de corte faz com que os esforços na usinagem sejam menores, por apresentarem baixo coeficiente de atrito. Atualmente a técnica PVD para deposição de material no revestimento tem permitido na usinagem alcances maiores de velocidade de corte e vida longa da ferramenta, quando comparados com as sem revestimentos. Além da cobertura TiN a PVD colaborou com a deposição de outros materiais de revestimento como nitreto de titânio-alumínio (TiAlN), e o TiAlCrN.

#### 2.2.5 Metal duro

Conforme afirma Ferraresi (1977), este é o mais importante material para ferramentas devido propiciar dureza a temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, combinações que obtidas pela variação de composição.

Segundo Diniz e Coppini (2008), o metal duro é um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro, formando com o aglomerado um material com altas propriedades como dureza e resistência à compressão.

Ainda Machado et al. (2011), confere que com a descoberta do aço-rápido houve um impulso para área dos materiais e um segundo impulso com o metal duro,

pois novamente as velocidades de corte aumentaram praticamente dez vezes (35 m/min para 250 m/min a 300 m/min).

Os metais duros são classificados conforme a norma ISO 513 (2004), sendo as classes:

- **P – aços:** todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica;
- **M – aços inoxidáveis:** aços inoxidáveis austeníticos e aços duplex (austeníticos/ferríticos) e aço fundido;
- **K – ferro fundido:** ferro fundido cinzento: ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável;
- **N – metais não ferrosos:** alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos;
- **S – superligas e titânio:** ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio;
- **H – materiais duros:** aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados.

#### 2.2.6 Metal duro com cobertura (GC)

Para Diniz e Coppini (2008), a finalidade da cobertura do metal duro é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e a peça, sendo o núcleo com tenacidade do metal duro simples.

Pesquisas de Machado et al. (2011), mostram que entre todo metal duro utilizado na indústria, os revestidos representam, atualmente, mais de 95%, com tendência a crescimento contínuo.

Ao contrário dos aços-rápidos que usam atualmente o PVD, os metais duros podem receber tanto um quanto o outro processo com utilização de temperaturas aproximadas a 1000 °C sem ocasionar problemas com a propriedade metalúrgicas do material. Os revestimentos são basicamente compostos de TiN, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiCN.

### 2.2.7 Cermet (CT)

Dois fatores contribuíram para o aparecimento das ferramentas de cermet. O primeiro foi a constatação de que a adição de TiC aumentava muito a resistência ao desgaste, principalmente na superfície de saída, dos metais duros, quando usinados aços. O segundo foi a escassez de tungstênio, durante a Segunda Guerra Mundial, que levou várias equipes de pesquisas a concentrar esforços no desenvolvimento de um material similar com as características do metal duro. Álisson Rocha et al., (2011).

Como explica Diniz e Coppini (2008), o cermet possui esse nome por possuir partículas de cerâmica e metal ligados por um aglomerante com estrutura semelhante as do metal duro. O grupo cermet são feitos de elementos como TiC, TiN, e possuem como elementos de ligação o Ni, podendo serem encontrados também Al, Co, Mo ou compostos de Mo<sub>2</sub>C, TaC, NbC, WC, AlN, TaN e outros.

### 2.2.8 Material cerâmico (CC)

Essas ferramentas possibilitam velocidade de corte excepcionalmente elevadas ao ponto de serem empregadas em máquinas específicas de rigidez e potências que permitem tais velocidades de usinagem.

Como os cerâmicos não possuem ainda uma classificação em literatura, são mais conhecidos pelas propriedades que eles oferecem: como dureza a quente extremamente importante quando se considera alta velocidade e temperatura, e em outros aspectos não é tão fácil a utilização na usinagem, entre elas, a baixa condutividade térmica e principalmente baixa tenacidade.

As classificações conhecidas como apresenta Diniz e Coppini (2008). Para ferramentas cerâmicas:

- **À base de óxido de alumínio (Al<sub>3</sub>O<sub>3</sub>);**
- **À base de nitreto de silício (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>).**



### 2.2.9 CBN (nitreto de boro cubico)

É uma classe de ferramenta para usinar materiais endurecidos, podendo utilizar velocidades de corte, avanços e rotações mais elevadas que na cerâmica. Possui boa resistência a variações de temperatura e a esforços mecânicos.

Segundo Diniz e Coppini (2008), o CBN é mais estável que o diamante, podendo usinar ligas ferrosas sem grandes problemas de desgaste por difusão. Existem vários tipos de CBN e de acordo com cada fabricante utiliza materiais diferentes e quantidade de aglomerantes como também tamanhos e distribuição de partículas. Os CBN's podem ser divididos em duas categorias, de acordo com suas aplicações:

- **CBNs para usinagem em desbaste ( $a_p$  entre 0,5 e 0,8 mm) ou para corte interrompido;**
- **CBN para usinagem em acabamento ( $a_p$  menor que 0,5 mm) ou para cortes contínuos ou com poucas interrupções.**

### 2.2.10 Diamante Policristalino (PCD)

Os PCDs foram produzidos em 1950, porém só na década de 70 que formaram parte do rol de ferramentas de corte. Segundo Machado et al. (2011), o diamante sintético é obtido sujeitando o carbono, na forma de grafite, a temperaturas e pressões extremamente altas e após sinterização ele se transforma em diamante e passa a possuir uma estrutura cubica de face centrada (CFC).

O diamante natural foi usado como ferramenta de corte por centenas de anos, pois trata-se do material de maior dureza e resistência ao desgaste da natureza. Além disso, possui excelente condutividade térmica. As ferramentas de diamante natural são usadas principalmente quando se requer superacabamentos nos componentes usinados. Acabamentos superficiais da ordem de  $R_a = 25$  nm podem ser obtidos com essas ferramentas se a máquina-ferramenta possuir rigidez. (Álison Rocha et al., 2011, p. 236).

E ainda afirma Machado et al., (2011), que a tenacidade desses policristalinos é bem superior à dos monocristais, portanto, o campo de aplicação é maior, apesar da maior dureza e resistência ao desgaste dos monocristais.

### 2.3 DESGASTE DAS FERRAMENTAS

Conforme Machado et al. (2011), independentemente da dureza ou resistência mecânica da ferramenta de corte sendo ela maior ou seja lá qual for sua grandeza comparado com a da peça usinada, sempre em algum momento do processo esta ferramenta sofrera algum tipo de desgaste. Diniz e Coppini (2008), afirma que existem diversos tipos de desgaste e avarias encontradas em ferramentas de corte e é importante diferenciá-los. Desgaste se diz quando há perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta e que as demais são avarias.

Na usinagem pelo menos três formas de desgastes podem ser encontradas na ferramenta:

- **Desgaste de cratera;**
- **Desgaste de flanco;**
- **Desgaste de entalhe.**

Exemplificação de formas de desgastes:

- **Desgaste de cratera:** é o produto do atrito ocorrente na superfície de saída entre a ferramenta e o cavaco. Esse desgaste pode não ocorrer em alguns processos pela cobertura do metal duro, cerâmicas e quando há uma peça frágil;
- **Desgaste de flanco:** ocorre na superfície de folga da ferramenta, ocasionado pelo contato entre ferramenta e peça. Esse tipo de desgaste gera deterioração do acabamento superficial da peça e modifica totalmente a aresta de corte original, fazendo com que a peça mude de dimensões e saindo da tolerância;

- **Desgaste de entalhe:** por falta de um consenso literário ao tratar essa forma de não tratar como forma de desgaste, é comum a ocorrência em usinagem de materiais resistentes a alta temperaturas, ligas Ti, Ni, Co, e aços inoxidáveis;
- **Deformação plástica:** pode haver a ocorrência de deformação plástica na aresta de corte, que segundo Diniz (2008), muitas vezes ocorre sob pressão altas aplicadas somadas a altas temperatura dando o surgimento de deformações plásticas da aresta de corte, tais deformações causam deficiências no controle de cavaco e deterioram o acabamento da peça;
- **Lascamento:** ao contrário do desgaste frontal de cratera que tira partículas continuamente, o lascamento caracteriza pela retirada de uma porção maior de material e provocam um mau acabamento superficial e quebra da ferramenta;
- **Trincas:** segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), as trincas pode ocorrer de duas maneiras, térmica ou esforços mecânicos, o primeiro geram trincas perpendicular a aresta de corte, o segundo geram trincar paralelo à aresta, ambos podem ser causadas pelo corte interrompido, acesso irregular de fluido;
- **Quebra:** como foi dito até agora muitos danos na ferramenta podem causar a quebra, mas a própria quebra pode ter sua origem sem dependência de danos na ferramenta devido a fatores como material duro, carga excessiva na ferramenta, entre outros.

### 2.3.1 Fatores que influenciam no desgaste das ferramentas

#### 2.3.1.1 Condições de usinagem

A evolução do desgaste da ferramenta é causada principalmente pelo aumento da velocidade de corte em seguida pelo avanço e então segue a profundidade de corte.

Como diz Diniz e Coppini (2008), a velocidade de corte é o parâmetro que mais influência no desgaste, pois quanto maior, mais aumenta a energia que é imputada ao processo.

**Tabela 1 - Vida da ferramenta**

<b>f (mm/volta)</b>	<b>V<sub>c</sub> (m/min)</b>	<b>Vida (m)</b>
0,16	300	1450
0,20	300	1530
0,24	300	1550
0,20	250	2600
0,20	300	1530
0,20	350	650

**Fonte: Retirada e editada do livro Tecnologia de Usinagem dos Materiais 6ª ed. pg.121**

### 2.3.1.2 Geometria da ferramenta

Segundo Diniz e Coppini (2008), uma diminuição do ângulo de posição, para mesmo avanço e mesma profundidade de usinagem, acarreta uma diminuição da espessura de corte e um aumento da largura de corte, permite maior vida útil da ferramenta.

Também podemos mencionar sobre outros fatores que influenciam na vida útil, sendo:

- **Ângulo da ponta, maior possível permitindo não enfraquecer a ponta da ferramenta;**

- **Maior ângulo de saída gera menor deformação do cavaco;**
- **Acréscimo do ângulo de folga diminui o desgaste frontal por reduzir o atrito ente ferramenta e peça.**

## 2.4 FLUIDO DE CORTE

Atualmente quando pensamos em usinagem e conseqüentemente na remoção de material de uma peça, logo surge a necessidade de selecionarmos um fluido que possa ser compatível com o processo, já que se torna de extrema necessidade a utilização desse artifício, podendo dizer assim, na obtenção de um acabamento melhor, economia no desgaste da ferramenta e conseqüentemente no processo de produção geral.

Os fluidos de corte apresentam características que variam de acordo com a sua composição química tendo cada um sua particularidade, e muitas vezes não conhecidas por completo devido à variedade de elementos de composição, além de possuírem suas vantagens e desvantagens próprias.

### 2.4.1 Funções dos fluidos de corte

As principais funções dos fluidos de corte são:

- **Em usinagens com baixas velocidades de corte exercem a função de lubrificação;**
- **Com a elevação da velocidade de corte sua principal função, desde que haja a penetração correta, exerce a função de refrigeração;**
- **Ainda permite uma função de remoção de cavaco na zona de corte;**

- Também promove a proteção da máquina e da ferramenta contra possíveis oxidações.

#### 2.4.2 Classificação dos fluidos de corte

Sem uma devida padronização, ainda não temos uma forma correta de classificação de fluidos de corte, embora a literatura comente sobre outros tipos de fluidos como sólidos e gasosos, os que mais são empregados na usinagem efetiva são líquidos. Podem ser classificados da seguinte maneira:

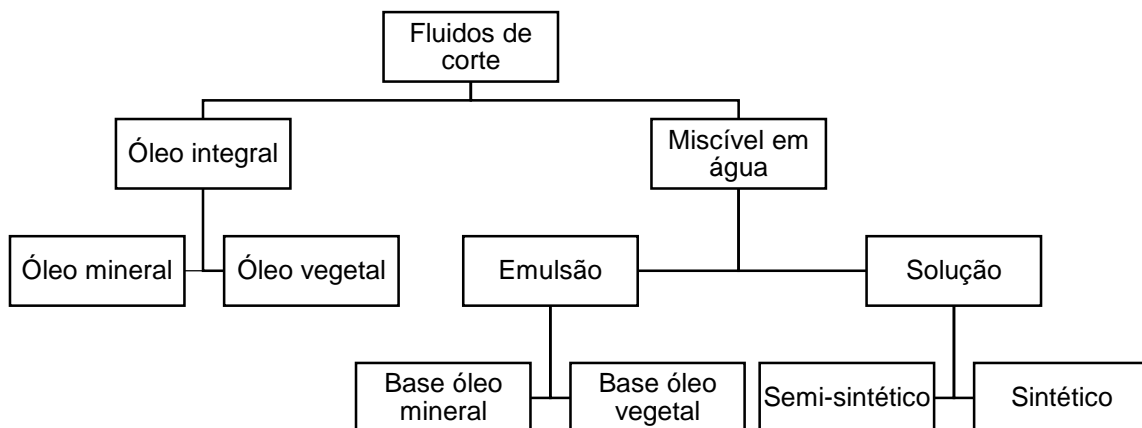


Figura 3 - Classificação dos fluidos de corte.

Fonte: Extraída e editada do livro Tecnologia de Usinagem dos Materiais 6ª ed. pg.175.

##### 2.4.2.1 Aquosos

Os fluidos aquosos são óleos que são possíveis misturar porção de água em suas devidas proporções, basicamente classificam-se:

- **Emulsões:** são emulsões de óleo em água, são compostos de pequena porcentagem de concentrado de óleo emulsificável, usualmente

constituído de óleo mineral ou vegetal, emulsificadores e outros ingredientes, dispersos;

- **Microemulsões (semi-sintéticos):** também formados por emulsões caracterizados por apresentarem de 5% a 50%, de óleo mineral no fluido concentrado e aditivos e compostos químicos que verdadeiramente dissolvem-se na água;
- **Soluções químicas (fluidos sintéticos):** são compostos monofásicos de substâncias químicas dissolvidas completamente na água. Não tem a necessidade de emulgadores, já que os compostos reagem formando fase única.

#### 2.4.2.2 Óleos

Segundo Machado et al. (2011), os óleos minerais são hidrocarbonetos obtidos a partir do refino do petróleo. Sua propriedade depende do comprimento da cadeia molecular. Os óleos integrais são, basicamente, óleos minerais puros ou com aditivos.

#### 2.4.3 Seleção do fluido de corte

Basicamente os principais fatores levados em consideração para uma seleção de fluidos de corte adequado para o processo são os materiais da peça, as condições de usinagem, o material da ferramenta, e operação de usinagem.

### 2.5 AÇOS

Aços são ligas metálicas com ferro e percentual de carbono que pode variar de 0,008 a 2,11%. São absolutamente diferentes dos ferros fundidos tanto na aplicação quanto quimicamente, possui um maior percentual de carbono.

Os aços além de possuírem os elementos de composição útil, os quais dão as propriedades metalúrgicas, ainda apresentam elementos provenientes do processo de obtenção dos mesmos como enxofre, fosforo, entre outros. E ainda em algumas particularidades são adicionados elementos como cromo, níquel, manganês, molibdênio, etc, no intuito de adicionar propriedades mecânicas à liga como resistência, ductilidade e dureza por exemplo.

### 2.5.1 Classificação dos aços

Para Chiaverini (1986), as impurezas encontradas no aço comum estão sempre abaixo de 2% e entre 2% e 5% são considerados de baixa liga, e acima de 5% são ditos altamente ligados. Alguns elementos como enxofre e fósforos são prejudiciais para propriedades físicas dos aços, pois tornam os aços quebradiços.

A classificação pode ser feita da seguinte maneira:

- **Aço baixo carbono:** contém em sua composição menos que 0,25% de carbono, na indústria são utilizados para fazer tubulações, em veículos, elementos de estruturas, e possuem propriedades muito dúcteis, porém existem ligas com alta resistência e para estas se torna necessário adicionar outros elementos de liga em até 10%;
- **Aço médio carbono:** são compostos de 0,25% a 0,6% de carbono e são sujeitos a tratamento térmico para melhorara suas propriedades, mais resistentes que o de baixa liga e menos dúcteis, são aços de engenharia que requerem resistência mecânica e ao desgaste;
- **Aço alto carbono:** são aços com carbono de 0,6% a 1,4% de carbono, possuem mais resistência e são os menos dúcteis, neles são adicionados o elemento de tungstênio, por exemplo, para construção de ferramentas.



### 2.5.2 Usinabilidade dos metais

Segundo Ferraresi (1977), a usinabilidade se define como uma grandeza tecnológica, que se expressa por meio de valores numéricos comparativos um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação ao outro tomado como padrão.

### 2.5.3 Aço SAE 1020

O aço da fabricante GGD 1020, que corresponde aos critérios da norma SAE 1020, é um dos aços ao carbono mais comum utilizado como aço para cementação com excelente relação custo benefício comparado com aços mais ligados para o mesmo propósito. Possui excelente plasticidade e soldabilidade. Após cementação é beneficiado, mas possui menor capacidade de endurecimento, comparado com o GGD 8620, por exemplo.

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Al</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
0,17 - 0,24	0,30 - 0,60	0,40 máx	----- ---	----- ---	0,04 máx.	0,05 máx.
0,18 - 0,23	0,60 - 0,90	0,15 - 0,35	0,30 - 0,40	0,02 - 0,05	0,025 máx.	0,02 - 0,04

**Quadro 1 - Composição Química do Aço SAE 1020**

Fonte: Extraído do Catálogo GGD Aço Construção Mecânica.

**Obs.** Condições de Fornecimento – Fornecido com dureza máxima de 260 HB.

### 2.5.3.1 Aplicações

É utilizado em componentes mecânicos de uso como engrenagens, eixos, virabrequins, eixos-comando, pinos guia, anéis de engrenagem, colunas, catracas, capas.

### 2.5.3.2 Forjamento

O aço GGD 1020 deve ser realizado na temperatura mínima de 900°C e máxima de 1260°C.

### 2.5.1.3 Tratamento Térmico

- **Recozimento:** O tratamento deve ser feito na temperatura entre 850 – 870°C por no mínimo 1 hora para cada 25 mm. Resfriar lentamente no forno;
- **Normalização:** O tratamento deve ser feito na temperatura próxima de 920 – 950°C por no mínimo 1 hora para cada 25 mm. Resfriar ao ar. Em casos especiais pode se utilizar ar forçado;
- **Cementação:** Podem ser utilizados os processos de cementação em caixa, a gás ou em banho de sal. A temperatura deve estar entre 900 – 925°C. O tempo de cementação deve ser controlado em função do potencial de carbono e da profundidade de endurecimento especificados. A cementação deve ser seguida pelo beneficiamento;
- **Têmpera:** A têmpera pode ser realizada diretamente após a cementação, bastando para isto diminuir a temperatura até 840 – 850°C, manter pelo tempo necessário para homogeneizar a temperatura na seção transversal e resfriar em água. A têmpera pode ser realizada

também após a cementação com resfriamento do componente até a temperatura ambiente. Neste caso, utilizar o mesmo procedimento descrito;

- **Revenimento:** Deve ser realizado imediatamente após a têmpera quando a temperatura atingir cerca de 70°C. O revenimento é realizado em temperaturas entre 150 – 200°C. No revenimento não há queda significativa da dureza, mas se garante uma melhor resistência à fratura e a formação de trincas superficiais na retífica;
- **Nitretação:** Este aço pode ser nitretado para elevar a resistência ao desgaste pelo endurecimento superficial. Para a nitretação o componente deve ser no estado recozido. A nitretação poder ser por processo gasoso ou de plasma. A presença da Camada Branca é imprescindível, com uma espessura superior a 12 µm.

#### 2.5.4 Aço SAE 1045

O aço GGD 1045, que corresponde aos critérios da norma SAE 1045, é um aço para beneficiamento com temperabilidade baixa, ou seja, baixa penetração de dureza na seção transversal, não se recomendando seu uso para seções superiores a 60 mm. Possui uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura. É utilizado em geral com durezas de 180 a 300 HB. Para grandes seções utilizar o tratamento térmico de normalização.

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Al</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
0,43 - 0,50	0,60 - 0,90	0,40 máx.	----- ---	----- ---	0,04 máx.	0,05 máx.
0,43 - 0,48	0,60 - 0,90	0,15 - 0,35	0,30 - 0,40	0,02 - 0,05	0,025 máx.	0,02 - 0,04

**Quadro 2 - Composição química do aço SAE 1045**

Fonte: Extraído do Catálogo GGD Aço Construção Mecânica.

**Obs.** Condições de Fornecimento – Fornecido com dureza máxima de 260HB.

#### 2.5.4.1 Aplicações

É utilizado na fabricação de componentes de uso geral onde seja necessária uma resistência mecânica superior à dos aços de baixo carbono convencionais. Aplicado principalmente em eixos em geral, pinos, cilindros, ferrolho, parafusos, grampos, braçadeiras, pinças, cilindros, pregos, colunas, entre outros.

#### 2.5.4.2 Forjamento

O aço GGD 1045 deve ser realizado na temperatura mínima de 870°C e máxima de 1240°C

#### 2.5.4.3 Tratamento Térmico

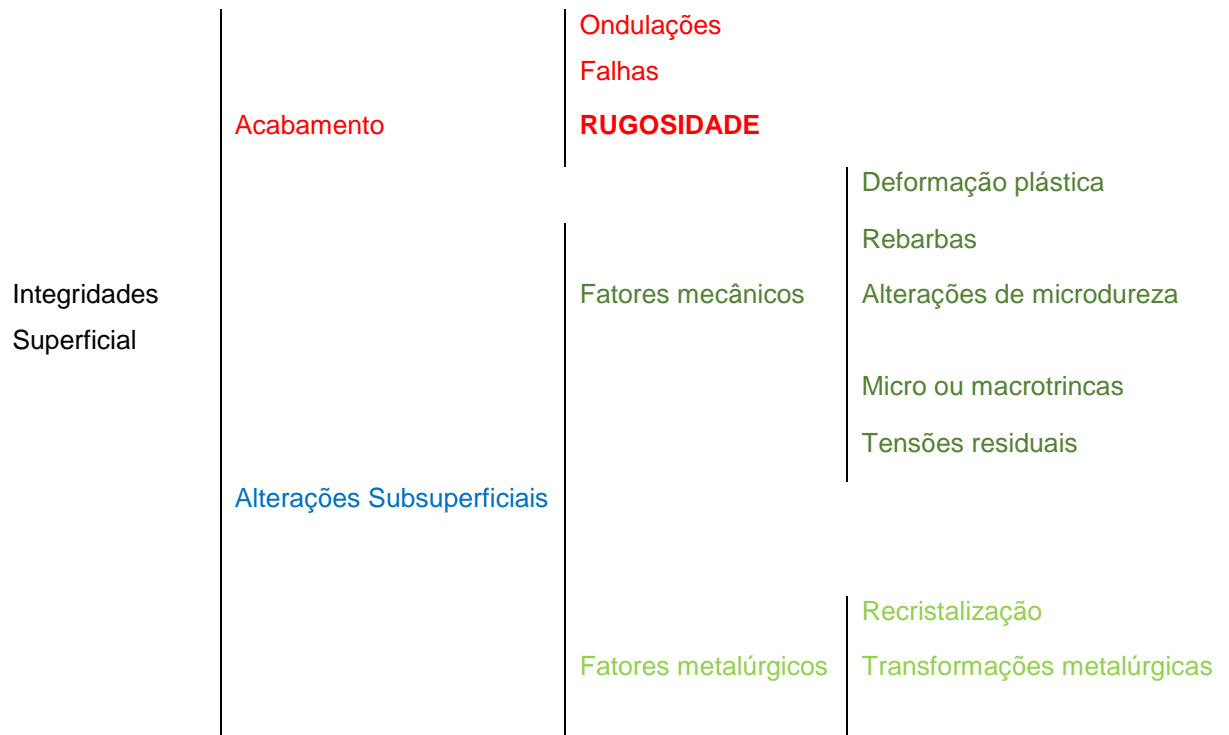
- **Recozimento:** O tratamento deve ser feito na temperatura próxima de 800 – 850°C por no mínimo 1 hora para cada 25 mm. Resfriar lentamente no forno;
- **Normalização:** O tratamento deve ser feito na temperatura próxima de 880 – 900°C por no mínimo 1 hora para cada 25 mm. Resfriar ao ar. Em casos especiais pode se utilizar ar forçado;
- **Têmpera:** Austenitizar em temperatura entre 820 – 850°C. Aquecer por 1 hora para cada 25 mm de espessura. Resfriar em água ou polímero. Para resfriamento em óleo (seções menores do que 10 mm) temperar a partir de 840 – 860°C;

- **Revenimento:** Deve ser realizado imediatamente após a têmpera quando a temperatura atingir cerca de 70°C. A temperatura de revenimento deve ser selecionada de acordo com a dureza especificada para o componente. Para isto utilizar a curva de revenimento orientativa. Manter na temperatura de revenimento por no mínimo 1 hora para cada 25 mm de espessura e utilizar no mínimo por duas horas. Resfriar em ar calmo;
- **Nitretação:** Este aço pode ser nitretado para elevar a resistência ao desgaste pelo endurecimento superficial. A dureza máxima depende da condição prévia de tratamento térmico. Nitretar com Camada Branca, Componentes beneficiados antes da nitretação terão melhor característica de endurecimento atingindo dureza máxima próxima de 600 HV. Recomenda-se profundidade de endurecimento entre 0,30 e 0,60 mm;
- **Têmpera Superficial:** Aquecer rapidamente até a temperatura de 820 – 860°C e resfriar em água ou óleo. As condições de tratamento dependem do tamanho e geometria da peça, bem como da dureza desejada e das características do equipamento.

## 2.6 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Quando mencionam-se sobre a integridade física de alguma coisa, não se refere nada mais do que a qualidade e as apresentações externas das dimensões do objeto analisado, ou de forma mais profunda, se houve ou não alterações em comparação com algo constituído pelas mesmas naturezas químicas e físicas e submetidas às mesmas forças que possivelmente podem alterar essas dimensões, bem como no aspecto visual ou seja lá qual for as discrepâncias observadas entre eles, sendo as avarias comparadas de forma superficial ou microscopicamente.

De forma geral, segundo Machado et al. (2011), esse termo leva a analisar durante a usinagem da peça variáveis como: influência da temperatura de corte, fluido, recuperação elástica, processos de deformações plásticas, rupturas, vibrações, tensões residuais, reações químicas, entre outros, que influenciam na formação do acabamento da superfície usinada. A adaptação abaixo nos retrata alguns fatores que afetam a integridade superficial em uma usinagem. A figura X demonstra a classificação da integridade superficial.



**Figura 4 - Adaptação da figura 9.1, Classificação de integridade superficial**  
**Fonte: Extraída e modificada do livro Teoria da Usinagem dos Materiais 2ª ed. pg.297.**

### 2.6.1 Rugosidade

A rugosidade como uma das classificações da integridade superficial sendo analisada e quantificada quando se quer um bom acabamento na usinagem, é produto de irregularidades microgeométricas as quais são inerentes do processo como arestas postiças, marcas de avanço, desgaste de flanco, deformação plástica da ferramenta, lascamento, etc. Sendo todos decorrentes de múltiplos esforços e dependentes de parâmetros e variáveis selecionadas pré-usinagem.

Como diz em seu livro Machado et al. (2011), a rugosidade depende de vários parâmetros, o que pode ser melhor entendido como variáveis de um processo de usinagem, como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, e operação de usinagem. Métodos aplicados a estatística podem apontar quais variáveis influenciam diretamente no resultado da rugosidade e a contribuição de cada uma delas.

Normalmente a rugosidade é especificada no projeto, e influenciadores, como falhas e ondulações devem ser evitadas na fabricação de superfícies já que são erros de fabricação.

#### 2.6.1.1 Quantificação da rugosidade

A peça usinada é avaliada quanto as suas características geométricas visíveis (macrogeométricas), e microgeométricas (rugosidade). São examinadas tanto antes do processo de usinagem quanto durante, em coerência com as tolerâncias especificadas em projeto. As variações com a macrogeometria no processo são mais fáceis de controlar porque sua natureza se firma na operação e rigidez da máquina-ferramenta, porem a microgeometria é mais difícil pelo fato de estar ligada a várias variáveis e avaliadas por diversos parâmetros, e se classificam:

- **Parâmetros de amplitude:** determinada pela altura de picos, profundidade de vales ou os dois, e considera o espaçamento das irregularidades ao longo da superfície;

- **Parâmetro de espaço:** determinada pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície;
- **Parâmetro híbridos:** combinação entre os parâmetros de amplitude e espaço.

Normas regulamentadoras como DIN, JIS, ISO, ABNT vem produzindo técnicas para avaliar a rugosidade de superfícies e a ABNT NBR ISO 4287 (2002), é uma delas.

Fragmento da tabela 9.1 do livro Teoria de Usinagem dos Materiais mostra alguns parâmetros de rugosidades possíveis de se mensurar.

Símbolo	Nome	Definição
$R_a$	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
$R_q$	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.

**Quadro 3 - Alguns parâmetros de rugosidade**

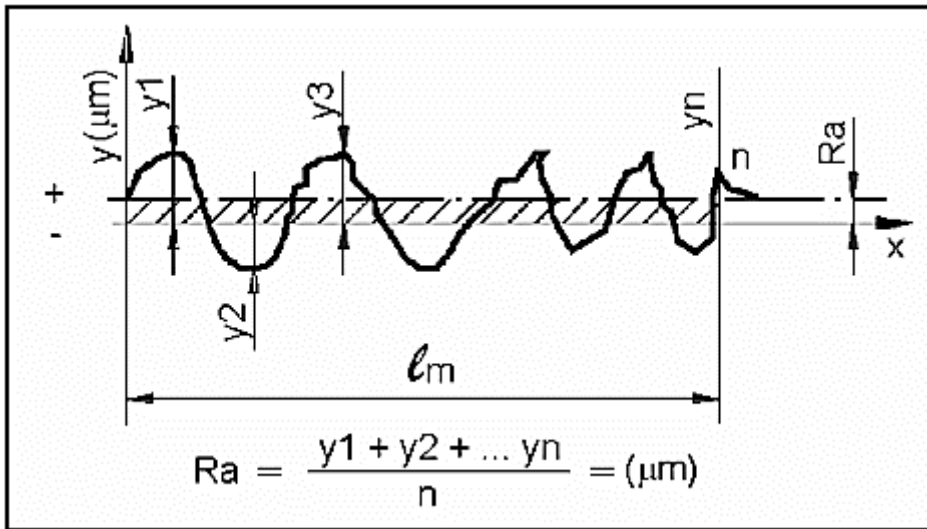
Fonte: Extraída do livro Teoria da Usinagem dos Materiais 2ª ed. pg.302.

Um dos parâmetros de amplitude mais utilizados para medir a rugosidade de uma superfície está o  $R_a$ , amplamente usado como controle de processo, pois alterações em seus valores representam alterações no processo, porém isoladamente não se mostra totalmente suficiente na identificação de algumas características



irrelevantes da superfície já que  $R_a$  diferentes podem ser encontrados em superfícies diferentes.

A figura 5 a seguir mostra alguns parâmetros de medidas para  $R_a$ .



**Figura 5 – Parâmetros de medida para  $R_a$**

Fonte: Extraída de *Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões*, Agostinho; Rodrigues; Lirani (2004).

Portanto, com a afirmação de Machado et al. (2011), o  $R_q$  pode ser uma alternativa muito suficiente neste caso já que tem efeito de ampliar os valores dos picos e vales isolados ou esporádicos, evidenciando defeitos ou marcas em superfícies bem acabadas além de representarem desvios padrão da distribuição de alturas do perfil.

#### 2.6.1.2 Cálculo de rugosidade no torneamento

Valores como  $R_a$  e  $R_t$ , podem ser calculados teoricamente, mas de forma indicativa somente já que estão acrescidos diversos fatores, como vibração e

desgaste a aresta. Quando temos um avanço ( $f$ ), menor que o raio da ponta ( $r_\epsilon$ ) da ferramenta, os valores  $R_a$  e  $R_t$  são calculados.

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_\epsilon} = \frac{f^2}{31,2 \cdot r_\epsilon} \quad (4)$$

$$R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (5)$$

### 2.6.1.3 Efeitos de parâmetros de usinagem na rugosidade

Machado et al. (2011), diz que quando na usinagem for efetuada com ferramentas novas o atrito entre superfícies é o mínimo observado, sobretudo por não haver vibrações e também aresta postiça de corte, portanto a rugosidade de acabamento da peça se faz basicamente através de marcas de avanços da ferramenta.

Como sabe-se que a rugosidade é um produto de uma enorme gama de variáveis no torneamento e também de como foram feitas as instalações do equipamento se tratando de sua rigidez, de forma geral, a rugosidade é menor quando:

- **Esforços de usinagem e vibrações são pequenos;**
- **Ponta da ferramenta possui um raio de arredondamento;**
- **Posicionamento de ferramenta e peça centradas, evitando desvios;**
- **Material da peça puro, livre de defeitos, trincas, inclusões e bolhas;**
- **Eixo principal da máquina-ferramenta alinhado e guias sem desgastes;**
- **Aresta de corte sem quebras ou desgastes;**
- **Corte sem aresta postiça.**

Machado et al. (2011), afirma que as condições de corte têm efeito sobre a rugosidade, sendo o avanço o parâmetro influente, isto é, altura de picos e vales das marcas de avanço aumentam em proporção quadrática ao avanço.

Usinagem com baixas velocidades de corte tendem a formar APC, e com um aumento do avanço nas condições desta velocidade os acabamentos superficiais ficam ainda piores, provavelmente pelo aumento da APC. Tornando a elevar a velocidade de corte, a aresta postiça de corte desaparece conseqüentemente, e também, ocorre elevação de temperatura que promove redução de resistência ao cisalhamento, que reduz as forças de usinagem e melhora o acabamento. No entanto, o aumento da velocidade do eixo gera por sua vez vibrações as quais novamente vão interferir no acabamento.

De maneira resumida e até de forma redundante, é interessante afirmar que seja qual for as variáveis de processo ou quais as aplicações dos parâmetros de usinagem empregados, haverá sempre interferência no acabamento da peça e conseqüentemente a perda efetiva de suas funções de projeto.

#### 2.6.1.4 Medição da rugosidade

Convencionalmente é empregado o rugosímetro para medir a rugosidade, a medição pode ser tanto por contato quanto sem contato, embora haja ambas as formas de coletar os dados, o emprego de coleta por contato é a mais aplicada pelo fato do custo se baixo, simplicidade e versatilidade.

O equipamento consiste de um apalpador de diamante que percorre um avanço por uma determinada distancias, este deslocamento oscila a ponta do diamante, essas oscilações são convertidas em sinais elétricos e amplificadas dando origem aos gráficos e transmitidos de forma numéricas.

De acordo com Novaski (1994), para medir a rugosidade de uma peça os seguintes parâmetros de medição (Figura 5) devem ser levados em consideração:

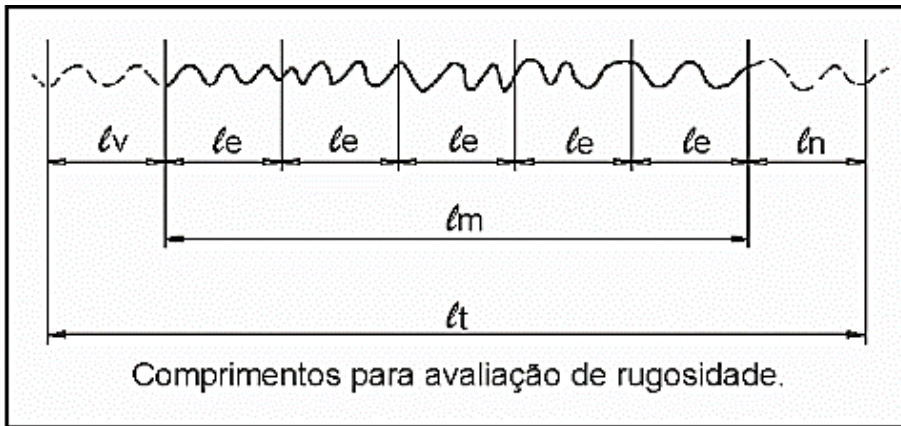


Figura 6 – Parâmetros de medida da rugosidade

Fonte: Extraída de Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões, Agostinho; Rodrigues; Lirani (2004).

- **Percurso inicial ( $l_v$ ):** tem a finalidade de amortecer as oscilações mecânicas e elétricas iniciais;
- **Percurso de medição ( $l_m$ ):** extensão útil de avaliação;
- **Comprimento de amostragem ( $l_e$ ):** são as divisões do percurso de medição de modo que permita separar as ondulações da rugosidade, é também chamado de cut-off;
- **Percurso final ( $l_n$ ):** tem a função de amortecer as oscilações mecânicas e elétricas finais do sistema de medição;
- **Percurso de apalamento ( $l_t$ ):** é a soma dos percursos de medição, inicial e final.

## 2.6 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

A importância de planejar um experimento com grande número de variáveis controláveis de processo vem sendo utilizada em larga escala na engenharia ultimamente. A maior parte dos processos podem ser descritas com grande gama de variáveis envolvidas tais como, temperatura, pressão, força, taxa de alimentação, controle de vazão, entre outros. Planejando os experimentos pode-se determinar

quais subconjuntos de variáveis tem maior influência no desempenho dos processos. Os resultados dos experimentos conduzem a:

- **Melhores rendimentos;**
- **Reduções de gasto;**
- **Otimização de custos;**
- **Aumento da qualidade do produto acabado e portanto elevação do grau de competitividade no mercado.**

Experimentos planejados são geralmente empregados sequencialmente. Isto é, o primeiro experimento com um sistema complexo que tenha muitas variáveis controláveis, é frequentemente um experimento exploratório (*screening experiment*), projetado para determinar que variáveis são mais importantes. Experimentos subsequentes são usados para refinar essa informação e determinar quais ajustes são requeridos nessas variáveis críticas, de modo a melhorar o processo. Finalmente, o objetivo do experimentalista é a otimização; ou seja, determinar quais os níveis resultantes das variáveis críticas no melhor desempenho do processo. (Montgomery, Douglas C., 1943, p. 339).

Cada experimento envolve uma sequência de atividades:

1. **Conjectura:** hipótese de motivação para o experimento;
2. **Experimento:** teste de investigação da conjectura;
3. **Análise:** análise estatística dos dados do experimento;
4. **Conclusão:** o que se aprendeu sobre a conjectura do experimento.

Segundo Montgomery (1943), experimentos planejados geram economia e eficiência no processo experimental e os métodos estatísticos conferem objetividade científica na tirada de conclusões.

Com o exemplo de Montgomery (1943), os experimentos devem seguir uma aleatoriedade, pois o efeito de qualquer variável de ruído, que possa influenciar os resultados, é aproximadamente balanceados. Por exemplo, se havendo um efeito de aquecimento da máquina de teste, ou seja, quanto maior o tempo, maior o resultado de interferência sobre o experimento. Se os testes fossem feitos em ordem crescente, do primeiro para o último, quaisquer diferenças observadas poderiam ser também devido ao aquecimento. Portanto torna-se de suma importância a aleatoriedade das variáveis de tratamento para que a resposta seja com dados confiáveis.

### 2.7.1 Introdução a análise de variância (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) é um procedimento estatístico utilizado para comparar três ou mais tratamentos. Existem diversas variações da ANOVA dependendo exclusivamente do tipo de aplicação do experimento solicitado por ela.

## 2.7.2 Conceitos básicos

### 2.7.2.1 Tratamento

Condição na qual se deseja medir ou avaliar em um experimento. Normalmente em um experimento é utilizado mais de um tratamento. Tratamentos que são dispostos em ordem são ditos quantitativos, e os quais não podem ser dispostos numa ordem são ditos qualitativos. Cada tipo de tratamento pode ser chamado também de um fator, além de serem conhecidos como variáveis independentes.

### 2.7.2.2 Unidade experimental

É a unidade que fornece os dados para serem avaliados, formadas por grupos ou indivíduos. A escolha da unidade experimental deve ser feita de forma que minimize o erro experimental.

### 2.7.2.3 Repetição

É o número de vezes que um tratamento aparece no experimento e depende dos recursos disponíveis, tipo de experimento e da variabilidade dele ou da variável resposta.

#### 2.7.2.4 Variável resposta

É qualquer característica que apresenta variações, quando o valor da variável não pode ser determinada antes da experimentação, tem-se uma variável aleatória e as que assumem valores enumeráveis são variáveis discretas. Também variáveis que assumem valores em um intervalo, são denominadas aleatórias contínuas.

#### 2.7.2.5 Delineamento experimental

Tem a finalidade de reduzir erros experimentais, é a forma como os tratamentos ou níveis de um fator são designados às unidades experimentais ou parcelas.

#### 2.7.2.6 Modelo e análise de variância

Em um experimento, cada observação  $Y_{ij}$  pode ser decomposta da seguinte forma:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \quad i = 1, \dots, I \text{ e } j = 1, \dots, J \quad (6)$$

em que:

$Y_{ij}$  é a observação do  $i$ -ésimo tratamento na  $j$ -ésima unidade experimental;

$\mu$  é média geral;

$\tau_i$  é efeito do  $i$ -ésimo tratamento;

$\epsilon_{ij}$  erro associado ao  $i$ -ésimo tratamento na  $j$ -ésima unidade experimental.

No experimento há o interesse em testar se compreende diferenças entre as médias do tratamento, então testa-se as hipóteses:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_I \\ H_1 : \mu_i \neq \mu_{i'} \text{ para pelo menos um par } (i, i'), \text{ com } i \neq i' \end{array} \right.$$

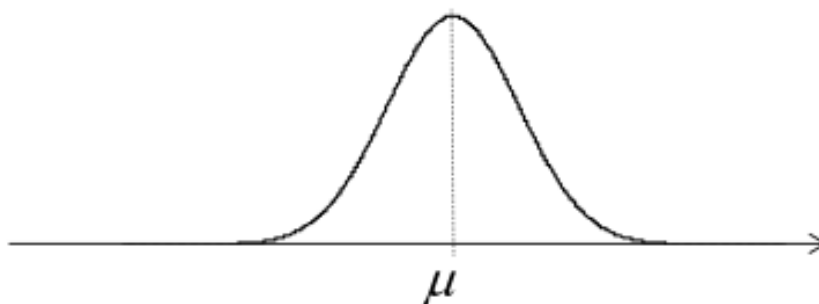
Em que:

$$\mu_i = \mu + \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, l.$$

Podendo escrever da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_l = 0 \\ H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ para pelo menos um } i. \end{array} \right.$$

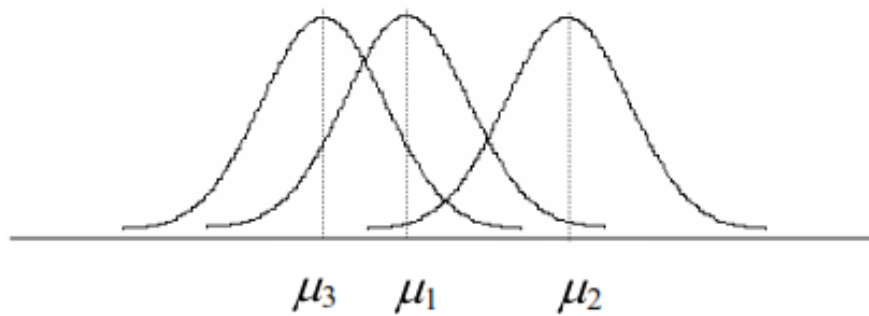
Sendo a hipótese nula verdadeira todos os tratamentos terão uma média comum. Ou seja, as diferenças observadas entre as médias amostrais são devidas a flutuações amostrais, conforme figura.



**Figura 7 – Gráfico de Variância Dentro da Média.**  
 Autor: Extraído de HENRIQUES (2010)

No entanto se a hipótese é falsa as diferenças observadas entre as médias amostrais são demasiadamente grande para serem devidas unicamente a flutuações amostrais, ou seja pelo menos dois tratamentos possuem diferença.





**Figura 8 – Gráfico de Variância Fora da Média.**  
 Autor: Extraído de HENRIQUES (2010).

A ANOVA, baseia-se na decomposição da variação total da variável resposta em partes podendo ser atribuídas aos tratamentos (variância entre), e ao erro experimental (variância dentro). Essa variação pode ser medida pela soma quadrática para cada componente:

- Soma dos quadrados entre grupos:

$$SS_A = n \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{\bar{x}})^2 \quad (7)$$

$$k-1 \quad (8)$$

$$S_b^2 = MS_A = \frac{SS_A}{k-1} \quad (9)$$

$$F = \frac{S_b^2}{S_p^2} = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (10)$$

- Soma dos quadrados dentro dos grupos:

$$SS_E = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \quad (11)$$

$$k(n-1) \quad (12)$$

$$S_p^2 = MS_E = \frac{SS_E}{k(n-1)} \quad (13)$$

- Total das somas quadráticas:

$$SS_T = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{\bar{x}})^2 \quad (14)$$

$$nk-1 \quad (15)$$

Estas formulas são calculadas através de softwares capazes de fazer análises de dados inclusos em tabelas, como exemplo planilhas Excel, como pode-se ver em uma tabela produzida pós tratamento usando a análise de variância:

**Tabela 2 – Modelo de tabela ANOVA para Excel**

<b>ANOVA</b>						
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Entre grupos</b>	Formula 7	Formula 8	Formula 9	Formula 10		
<b>Dentro dos grupos</b>	Formula 11	Formula 12	Formula 13			
<b>Total</b>	Formula 14	Formula 15				

A análise dos dados pode ser feita de duas maneira, pode-se tanto avaliar a significância da estatística  $F$ , quando este for maior que o  $F$  crítico rejeita-se a hipótese proposta de  $H_0$ , quanto utilizar o *valor-P*, onde a observação deve ser feita comparando o valor da significância  $\alpha$ , quando  $P < \alpha$ , então também rejeita-se a hipótese de nulidade.

O procedimento seguinte é analisar as médias de tratamento utilizando testes que comparam as médias ou contrastes para identificar qual ou quais tratamentos são diferentes.

### 2.7.3 Experimentação subsequente com teste *Tukey* (múltiplas comparações).

Após efetuada a análise dos dados e constatado a existência da diferença entre tratamentos, pode ser interessante avaliar a magnitude destas diferenças ou diferença utilizando testes de comparações múltiplas.

O teste Tukey permite comparar qualquer contraste que seja entre duas médias de tratamento, este teste se baseia na Diferença Mínima Significativa (DMS). Foi desenvolvido para amostras de igual tamanho, neste teste duas médias amostrais são comparadas pela formula:

$$S_{T(1-\alpha)} \cdot \sqrt{\frac{MS_E}{2} \left( \frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (16)$$

Onde,  $S_{T(1-\alpha)}$  é o quantil de probabilidade  $(1-\alpha)$  da distribuição da “*Studentized Range*” com  $(k, N-k)$  graus de liberdade  $S_{T(k, N-k)}$ :

$$P(W \leq S_{T(1-\alpha)}) = 1 - \alpha, \quad W \sim S_{T(k, N-k)} \quad (17)$$

As médias amostrais são significativamente diferentes, se:

$$|\bar{x}_i - \bar{x}_j| \geq S_{T(1-\alpha)} \cdot \sqrt{\frac{MS_E}{2} \left( \frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (18)$$

Como o teste Tukey é independente do teste F, é possível que, mesmo significativo o valor de F, não se encontra diferenças significativas entre médias.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As metodologias empregadas para os ensaios de usinagem no laboratório de manutenção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, foram com base nos métodos propostos neste trabalho. Os ensaios determinam os torneamentos com pastilhas intercambiáveis tipo “W” (formato geométrico), da fabricante ISCAR, designação WNMG 060404-TF, classe de usinagem IC807, e WNMG 060404-PP, classe de usinagem IC8250, com suporte externo negativo, torneamento ISO, Família MWLNR/L-W para ferramentas externas de fixação por cunha para pastilhas trigon e fluido de corte ecológico composição de lubrificantes semissintéticos, QUIMATIC ME-1 pré-emulsionado concentrado para usinagem de metais em geral.

As análises foram efetuadas em duas etapas sendo uma análise preliminar para definir os parâmetros de usinagem e outra final no qual avaliará quais foram as melhores variáveis aplicadas no processo de torneamento. Para isso utilizou-se rugosímetro MITUTOYO SJ-210, microscópio digital DINO-LITE AM413TL, Paquímetro analógico Vernier Caliper e análise computacional dos dados com softwares “R” e Excel.

#### 3.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os materiais (aços carbono SAE 1045 e SAE 1020), foram fornecidos no perfil de barra circular (redondo), com 2000 mm, diâmetro de 30 mm, e durezas de no máximo 260 HB, trefilado.

No intuito de manter as dimensões do corpo de prova similares, foram efetuados cortes da barra em pedaços como transmite o Anexo A, sendo o diâmetro mantido no fracionamento das barras devido os materiais serem trefilados, portanto não há variações do diâmetro que interferem no trabalho.

Após o trabalho de corte e verificações das dimensões, para etapa seguinte foram feitas o faceamento de um dos lados dos corpos de prova utilizando o torno

Nardini Ms 205 (Mascote), sendo os corpos de prova em 4 unidades para cada tipo de material e com as mesmas dimensões entre si, Anexo B. Em seguida foram determinadas para as análises preliminares as sequencias de usinagens, conforme quadro 4 do item 3.2.1, com variação de rotação.

### 3.2 FERRAMENTAS

As ferramentas usadas para o ensaio foram as pastilhas intercambiáveis:

- **WNMG-TF:** Aresta dupla, ângulos de inclinação positiva para evitar endurecimento de tensão. O ângulo de inclinação varia para negativo ao longo da aresta para evitar lascamento. Usado para carbono e liga de aço e ligas resistentes à alta temperatura.

Dados técnicos sobre as características da ferramenta com revestimento em PVD, segue no quadro 13:

ISO Range - P/M/K	(P10-P30)(M05-M20)(K10-K30)
ISO Range - H/S/N	(H05-H15)(S05-S20)
TRS	560
HRA	92.80

Tipo de Cobertura	PVD
Camadas da Cobertura	TiAlN+TiN

**Quadro 13 - Características do inserto WNMG 060404 – TF IC807 – COD. 5508229**  
**Fonte: Extraído de <[www.iscar.com/eCatalog](http://www.iscar.com/eCatalog)>.**

- **WNMG-PP:** Aresta dupla, inclinação positiva, aresta afiada e positiva radial. Para ligas resistentes ao calor, aço inoxidável e ligas de alta temperatura.

Dados técnicos sobre as características da ferramenta com revestimento em CVD, segue no quadro 14:

ISO Range - P/M/K	(P10-P35)(M05-M20)
ISO Range - H/S/N	
TRS	350
HRA	91.00

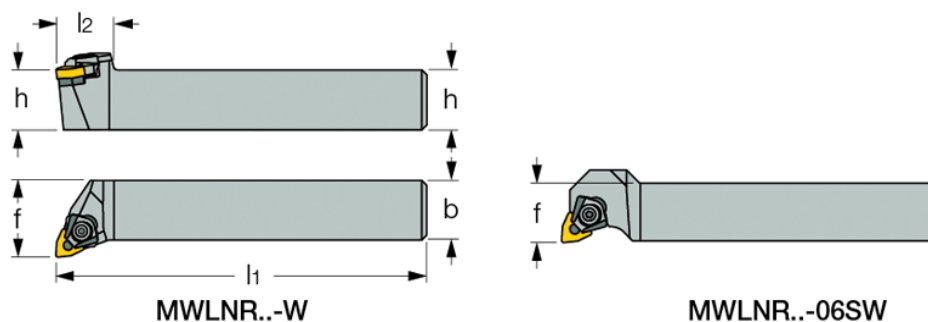
Tipo de Cobertura	CVD
Camadas da Cobertura	TiCN+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiN

**Quadro 14 - Características do inserto WNMG 060404 I – PP IC8250 – COD.5550528**  
**Fonte: Extraído de <[www.iscar.com/eCatalog](http://www.iscar.com/eCatalog)>.**

As pastilhas intercambiáveis selecionadas se deram com o objetivo de criar variáveis no processo, e, por fim avaliar os dados pós-usinagem, verificando as alterações entre o acabamento obtido e quais as melhores condições para se trabalhar coerentes aos parâmetros escolhidos.

Como os materiais usinados são enquadrados nas classes P1 e P3 (Aço e aço fundido não ligado, aço de corte livre <0,25%C, e Aço e aço fundido não ligado, aço de corte livre <0,55%C, respectivamente), ambos aceitam uma velocidade de corte entre 200-300 m/min, e ainda uma diferença destacada entre elas, apresentam coberturas em TiAlN+TiN (PVD) e TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN (CVD), o que dá possivelmente mais uma variável a ser avaliada.

Com relação ao suporte para pastilhas trigon a figura 21 ilustra o suporte MWLNR 2020K-06W:



**Figura 9 - Detalhes do suporte MWLNR**  
 Fonte: Extraído de <www.iscar.com/eCatalog>.

A seguir é apresentado o quadro das dimensões do suporte MWLNR:

h	B	l1	l2	f	Ga°	Gr°	R/L
20.0	20.0	125.00	25.0	25.0	-6	-6	R

**Quadro 15 - Dimensões do suporte MWLNR em (mm)**  
 Fonte: Extraído de <www.iscar.com/eCatalog>.

### 3.3 MATERIAL

Os materiais utilizados (Aço SAE 1020 e SAE 1045), para o ensaio foram adquiridos da Sul Ferração, distribuidora de aços e metais em geral localizado em Londrina – Paraná.

As propriedades químicas são conforme norma SAE, AISI, ABNT e estão diretamente relacionadas com a usinabilidade dos materiais, pois são elas que darão propriedades como ductilidade, tenacidade, resistências a corrosão ou a altas temperaturas.

### 3.4 FLUIDO DE CORTE

Utilizou-se como fluido de corte o semissintético QUIMATIC ME-1. É um óleo solúvel semissintético com características de lubricidade de um óleo solúvel mineral convencional (emulsão leitosa branca), mas com vida útil de um óleo solúvel semissintético (mais prolongada). É ecológico, isento de nitrito, boro, cloro, enxofre; compostos aromáticos e metais pesados. Não ataca componentes das máquinas operatrizes e das peças usinadas. Não mancha metais amarelos.

Entre os benefícios que traz para usinagem se encontra:

- **Excelente refrigeração e acabamento** – permite maior velocidade de usinagem;
- **Pré-emulsionado** – emulsão leitosa branca estável e sem espuma: maior facilidade de diluição;
- **ME (Molecular Edge) – Atração Molecular:** excelente refrigeração com ótima lubrificação;
- **Excelente proteção anticorrosiva;**
- **Aumenta a vida útil das ferramentas.**

### 3.5 ENSAIO DE USINAGEM

Os ensaios de usinagem foram realizados em um trono Nardini Ms 205 (Mascote), apresentando as seguintes características:

- a) Barramento com guias temperadas e retificadas;
- b) Cinematismo com elevado diapasão e constante progressão geométrica;
- c) Engrenagens construídas em aço especial, temperadas e retificadas;



- d) Árvore construído em aço especial, temperado e retificado e apoiado em rolamentos de precisão;
- e) Amplo número de roscas e avanços sem necessidade de troca de engrenagens;

Construção conforme norma ABNT 9436, figura 7.



**Figura 10 – Torno Nardini Ms 205**

### 3.5.1 Metodologia dos Ensaiois finais

Os ensaios foram realizados com as seguintes combinações:

1. Usinagem dos corpos SAE 1020 e SAE 1045, sem fluido refrigerante e com a pastilha tipo CVD;
2. Usinagem dos corpos SAE 1020 e SAE 1045, com fluido refrigerante e com a pastilha tipo CVD;
3. Usinagem dos corpos SAE 1020 e SAE 1045, sem fluido refrigerante e com a pastilha tipo PVD;

4. Usinagem dos corpos SAE 1020 e SAE 1045, com fluido refrigerante e com a pastilha tipo PVD;

As sequencias acima foram repetidas três vezes cada.

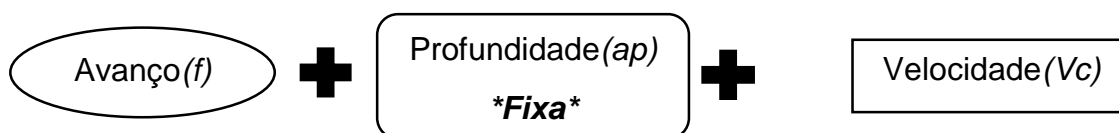
Os dados de corte foram obtidos através de uma análise preliminar de parâmetros, na qual buscou-se comparar com base nos acabamentos dos materiais analisados, qual foram os parâmetros de torneamento que deram melhor resultado, o qual teve-se referencias pelos estudos de Franthelio e Pablicio Lino 2015, que compararam a usinabilidade de aços, com o objetivo de analisarem a rugosidade e o resíduo principal do material produzidos pela usinagem, cavaco.

A aplicação de um ensaio preliminar neste trabalho teve a finalidade de levantar dados, portanto argumentos e base fundamentada na comparação dos corpos de prova que foram submetidas às variáveis de torneamento.

No experimento preliminar restringe-se em variar somente os parâmetros de corte, evitando que o ensaio fornecesse uma quantidade muito grande de dados para uma posterior análise, sendo as variações:

- **Avanço de corte ( $f$ );**
- **E velocidade de corte ( $V_c$ ).**

A metodologia aplicada em laboratório se descreve na aplicação de uma velocidade de corte com um determinado avanço, e admitindo uma profundidade de corte fixa para todos os experimentos, como demonstra o fluxograma 1:



**Fluxograma 1 - Variáveis de parâmetro.**

Utilizando uma fração da barra de 2 m, foi usinado um perfil circular de 200 mm/ 30 mm de  $\Phi$ , em 150 mm em seu eixo longitudinal com intervalos para variação de velocidade de corte 30mm cada intervalo, os corpos de prova foram submetidos ainda

a dois passos com profundidade de corte de 1 mm, para não variar muito a velocidade de corte, para o experimento usou-se quadros derivados do modelo visto na próxima página:

			<i>f</i>						
Unid.mm			0,042	0,051	0,117	0,125	0,151	Rotação 400	
	<b>ap</b>	1							
$\phi 1$	30 mm								

**Quadro 4 - Modelo de cruzamento de parâmetros.**

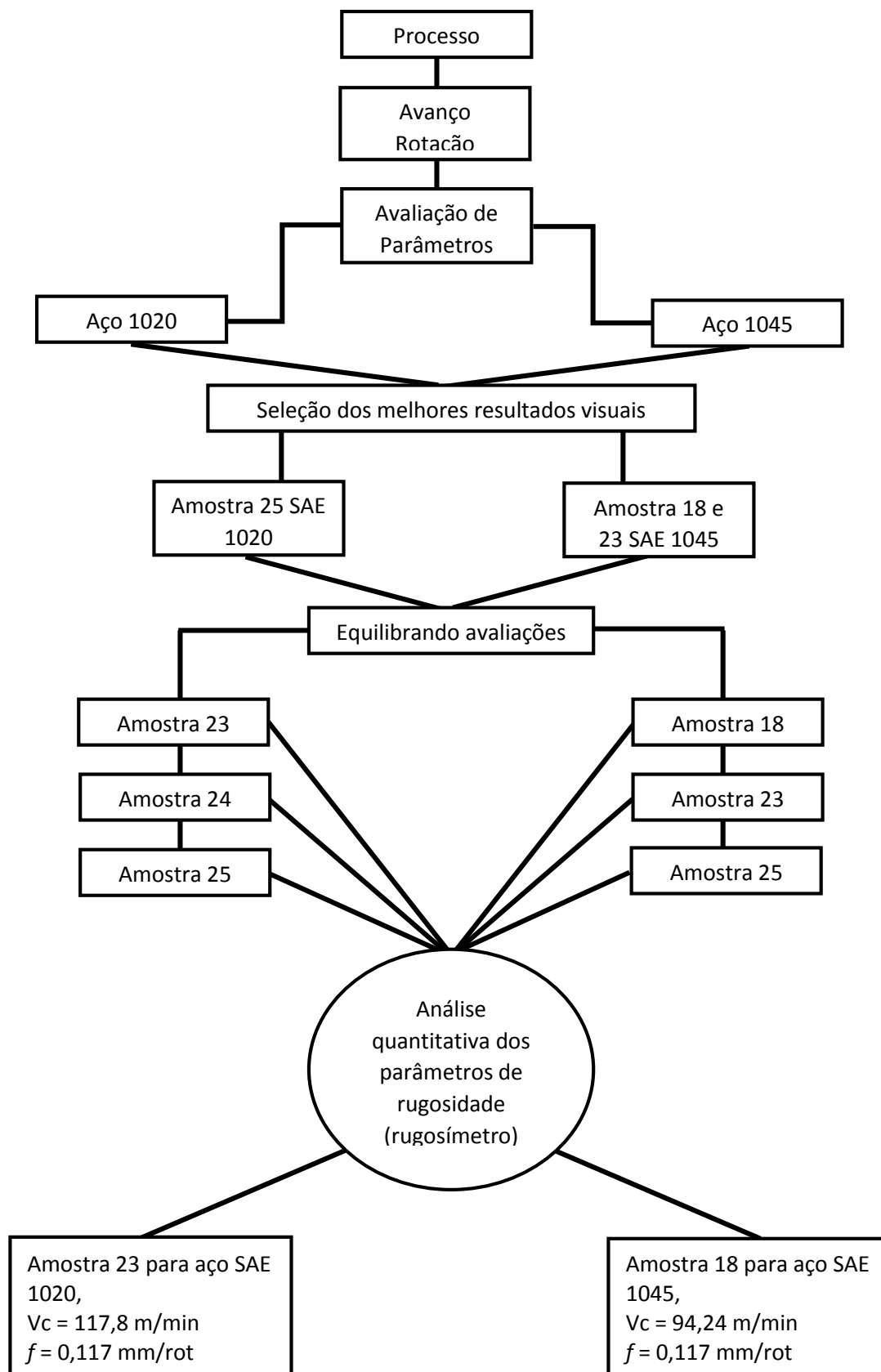
Fonte: Autoria própria.

Sendo assim, foi utilizado as rotações de 400, 630, 800, 1000 e 1250 rpm com avanços de 0.042, 0.051, 0.117, 0.125 e 0.151 mm e profundidade de corte fixa de 1 mm para usinar ambos os materiais.

### 3.5.2 Ensaio Preliminar, Comparando as Melhores Condições


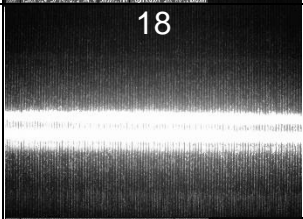
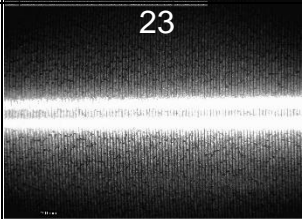
No ensaio preliminar, foram realizados testes para definir as melhores condições quando cruzamos avanços e velocidades de corte.

A figura 10, ilustra o fluxograma do processo



**Fluxograma 2 - Fluxograma de processos de usinagem, definição de parâmetros**

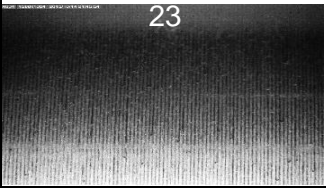
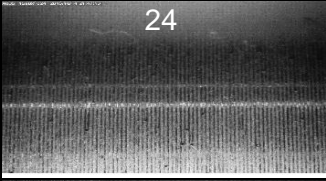
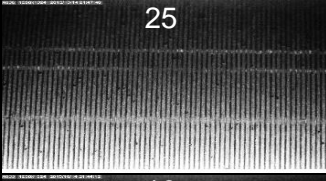

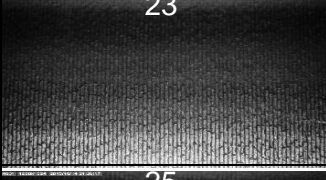
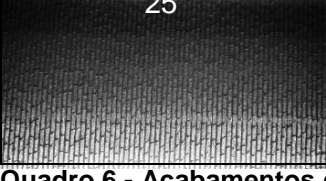
Segue as informações extraídas dos quadros confeccionados do torneamento para determinação de parâmetros em ensaio preliminar, e sobre as condições que foram mais favoráveis na seleção entre variações desses parâmetros no processo de usinagem:

Material	Foto	Vc(m/min)	Rpm	f(mm/rot)	ap(mm)	$\Phi$ (mm)
1020		117,81	1250	0,151	1	30
1045		94,24776	1000	0,117	1	30
1045		117,81	1250	0,117	1	30

**Quadro 5 - Seleção dos melhores resultados.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Com os resultados obtidos, foi possível selecionar entre as condições analisadas três que apresentaram um acabamento superficial favorável. Por conveniência, já que os dados forneceram uma amostra de aço 1020 para duas de 1045, o mais adequado foi comparar três resultados melhores de cada ensaio, ou seja, do quadro com os resultados de variações selecionou-se por meio de comparação três melhores ensaios do aço 1020 e três do aço 1045 para empregar a comparação de rugosidade e análise geral dos dados, e então, a seleção dos parâmetros que mais aproximou do desejado para usinagem definitiva em laboratório.

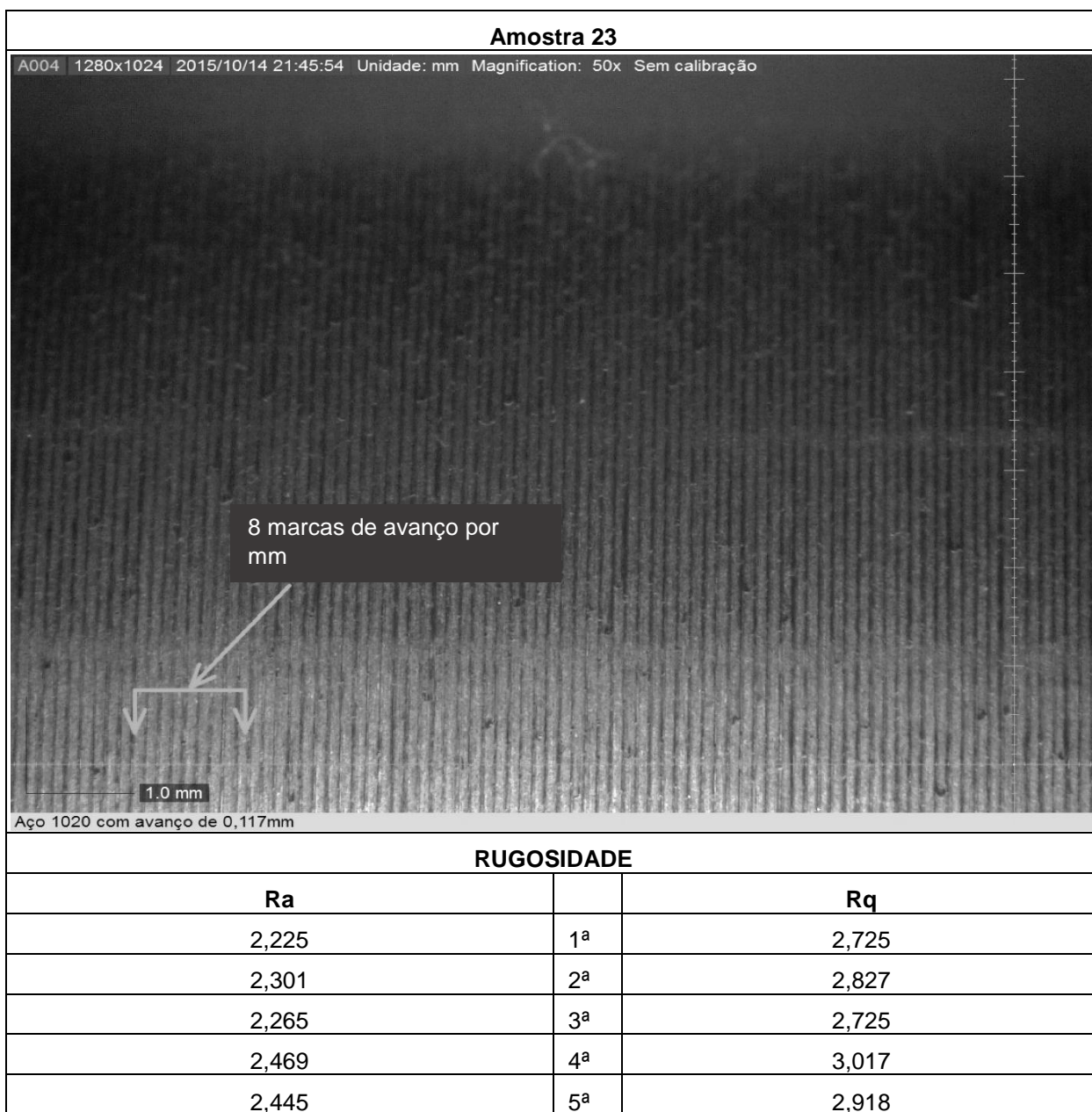
Conforme análise dos ensaios apresentados, pode-se gerar o seguinte quadro:

Foto	ap (mm)	f (mm)	Vc (m/min)	rpm	Material	Φ (mm)
 23	1	0,117	117,809	1250	1020	30
 24	1	0,125	117,809	1250	1020	30
 25	1	0,151	117,809	1250	1020	30
 18	1	0,117	94,24776	1000	1045	30
 23	1	0,125	94,24776	1000	1045	30
 25	1	0,151	94,24776	1000	1045	30

**Quadro 6 - Acabamentos que foram satisfatórios para análise quantitativa.**

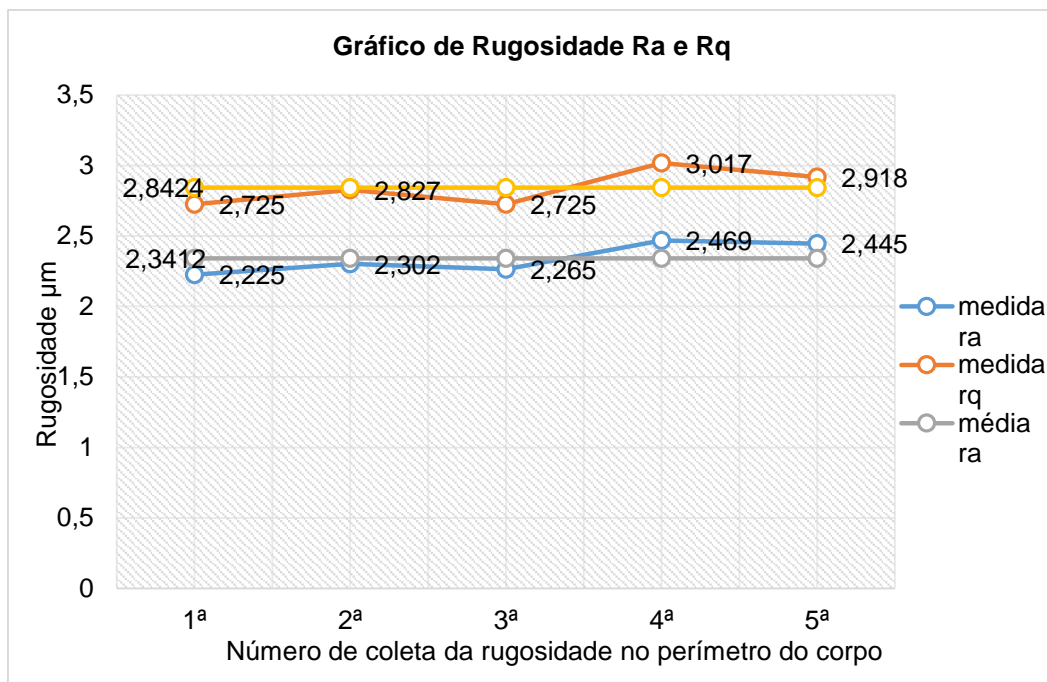
Fonte: Autoria própria.

Com base no quadro 12, aplica-se uma análise mais aprofundada na comparação da superfície dos ensaios obtidos e buscando a quantificação para tais superfícies mensurando a rugosidade com base nas medidas de Ra e Rq respectivamente, como mostra os quadros a seguir para cada parâmetro:



**Quadro 7 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1020 com f de 0,117 mm.  
Fonte: Autoria própria.**

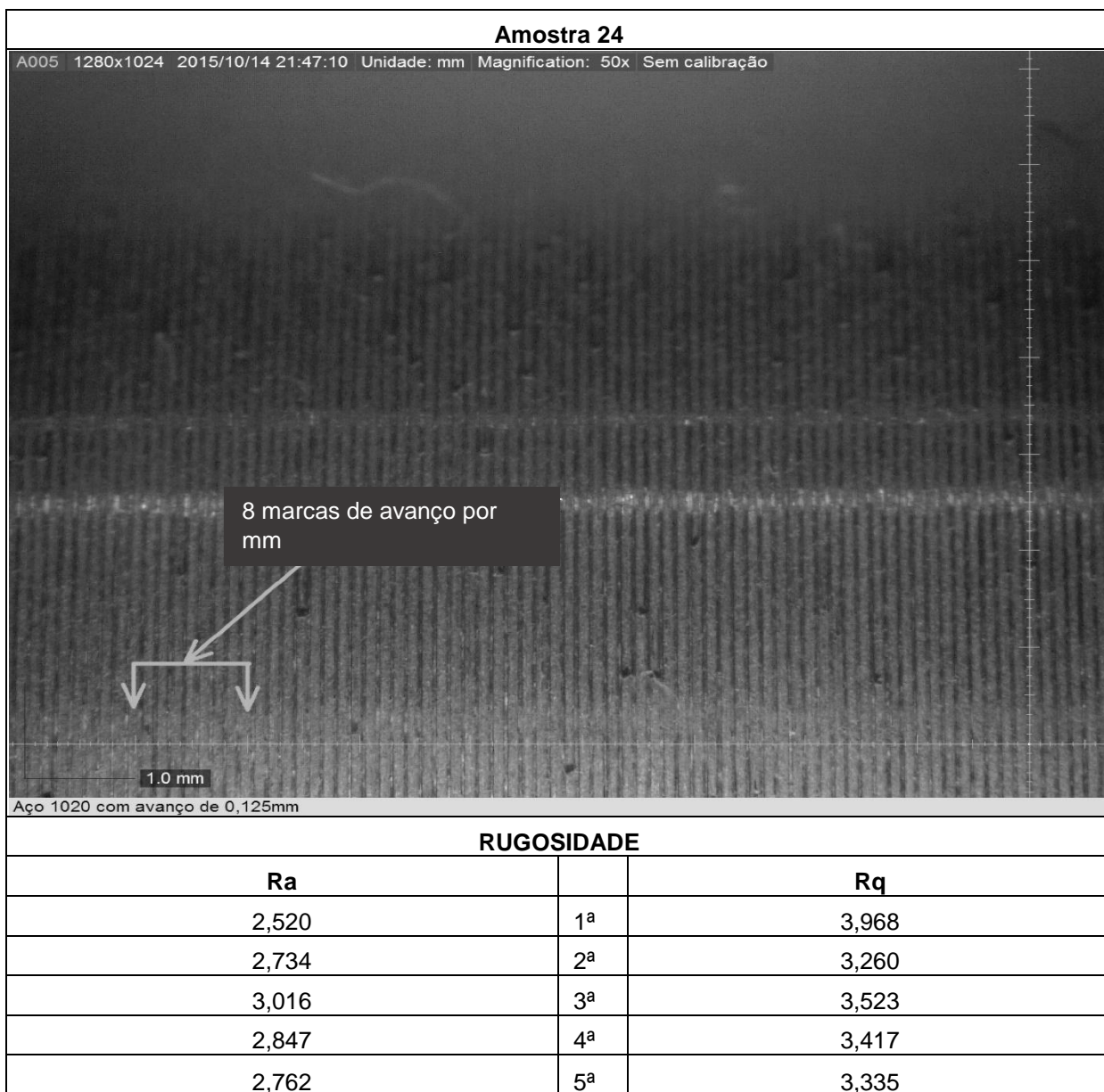
A figura 10, demonstra o gráfico da rugosidade de acordo com os dados obtidos nesta amostra.



**Figura 11 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1020 com  $f$  de 0,117 mm.**  
**Fonte: Autoria própria.**

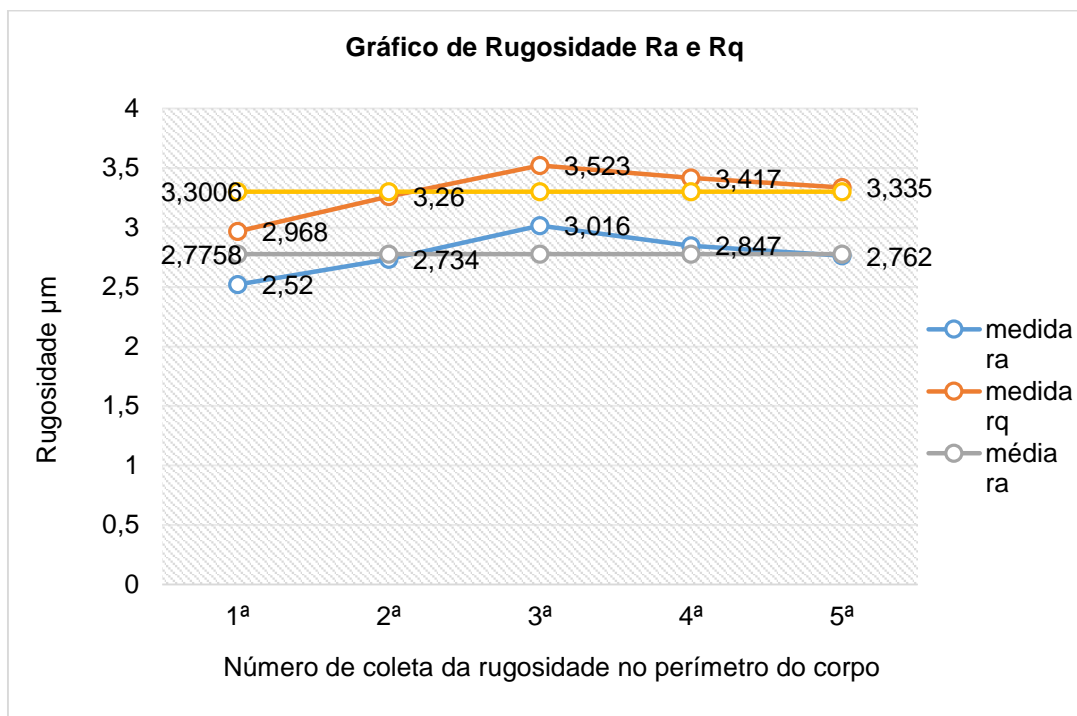
Outra amostra com uma boa resposta de acabamento foi a que aplicou um  $f = 0,125$  mm, cujo quadro a seguir mostra as devidas medidas Ra e Rq:





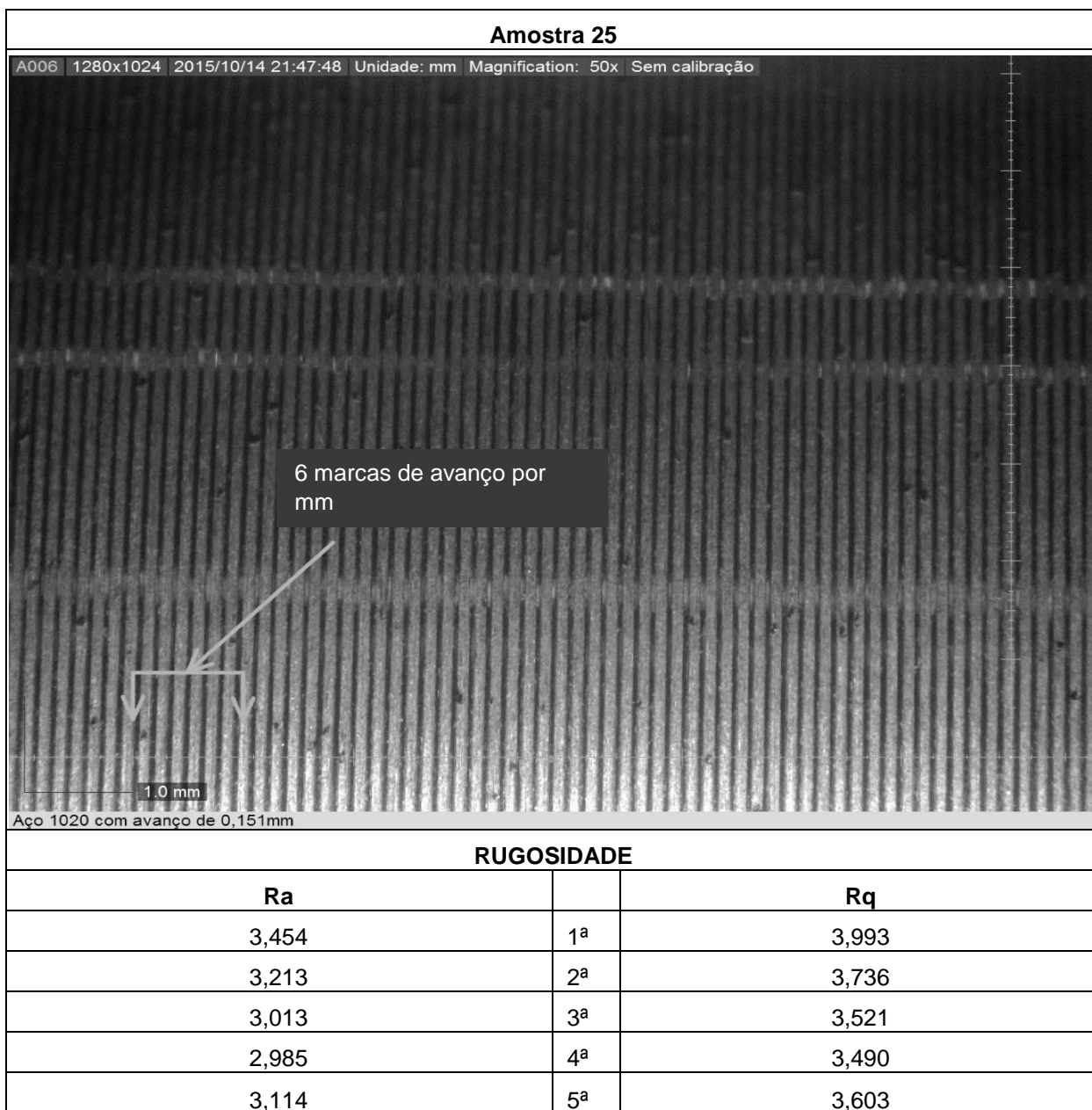
**Quadro 8 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1020 com f de 0,125 mm.**  
 Fonte: Autoria própria.

Para a amostra 24, obteve-se o seguinte gráfico ilustrado na figura 11.



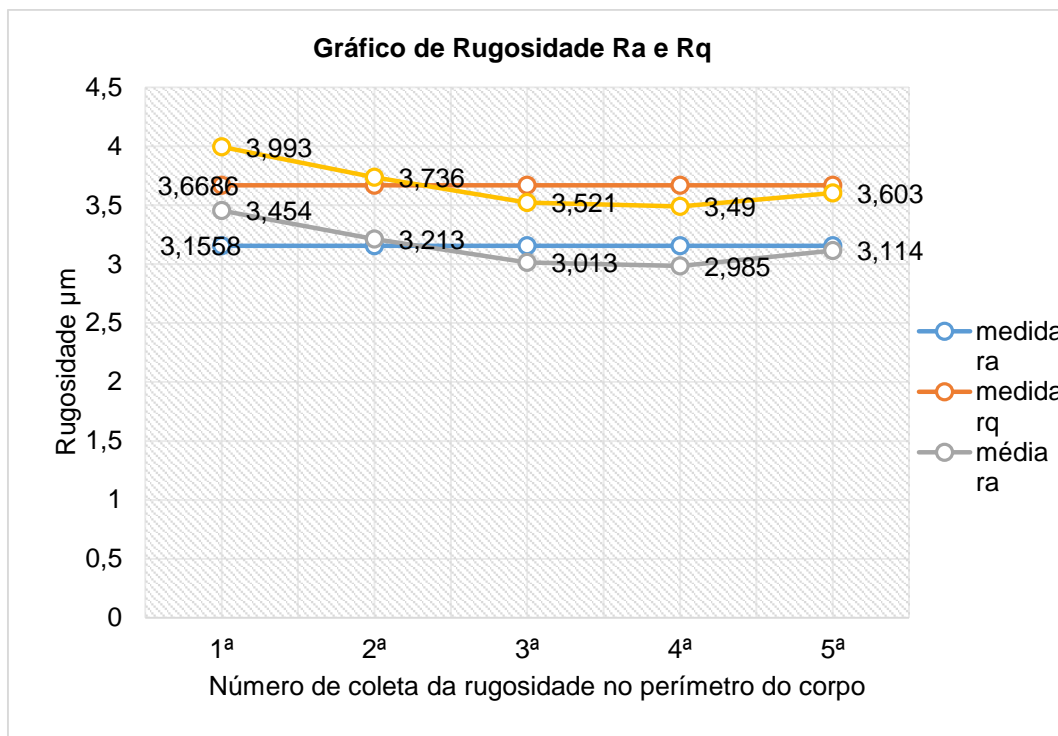
**Figura 12 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1020 com f de 0,125 mm.**  
Fonte: Autoria própria.

Ainda para o mesmo aço SAE 1020, aplicando um  $f = 0,151$  mm, conforme mostra o quadro 9, coletou-se os seguintes dados:



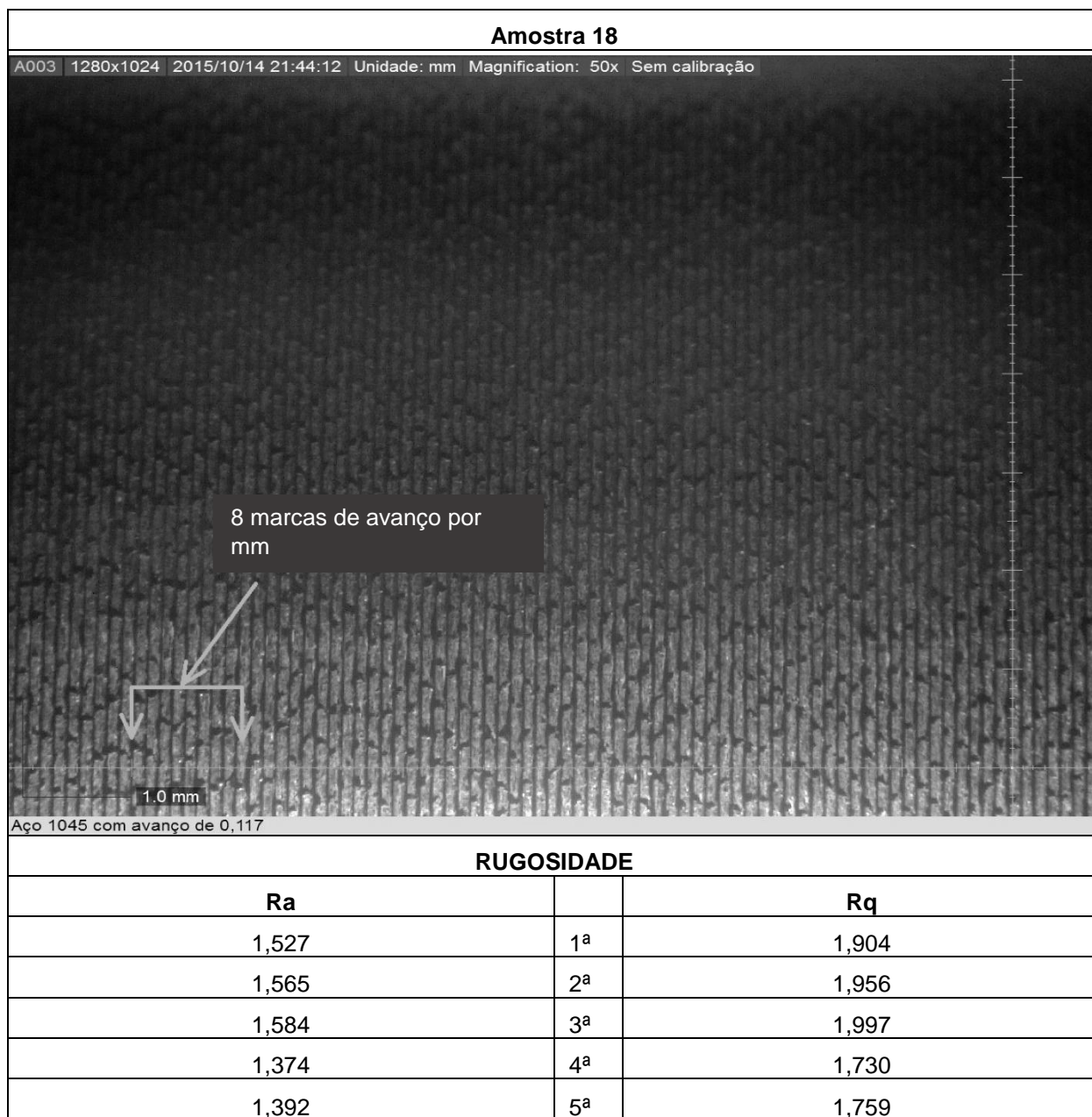
**Quadro 9 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1020 com  $f$  de 0,151 mm.  
Fonte: Autoria própria.**

De acordo com os dados da coleta, a figura 12 demonstra as rugosidades, como apresentado abaixo:



**Figura 13 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1020 com f de 0,151 mm.  
Fonte: Autoria própria.**

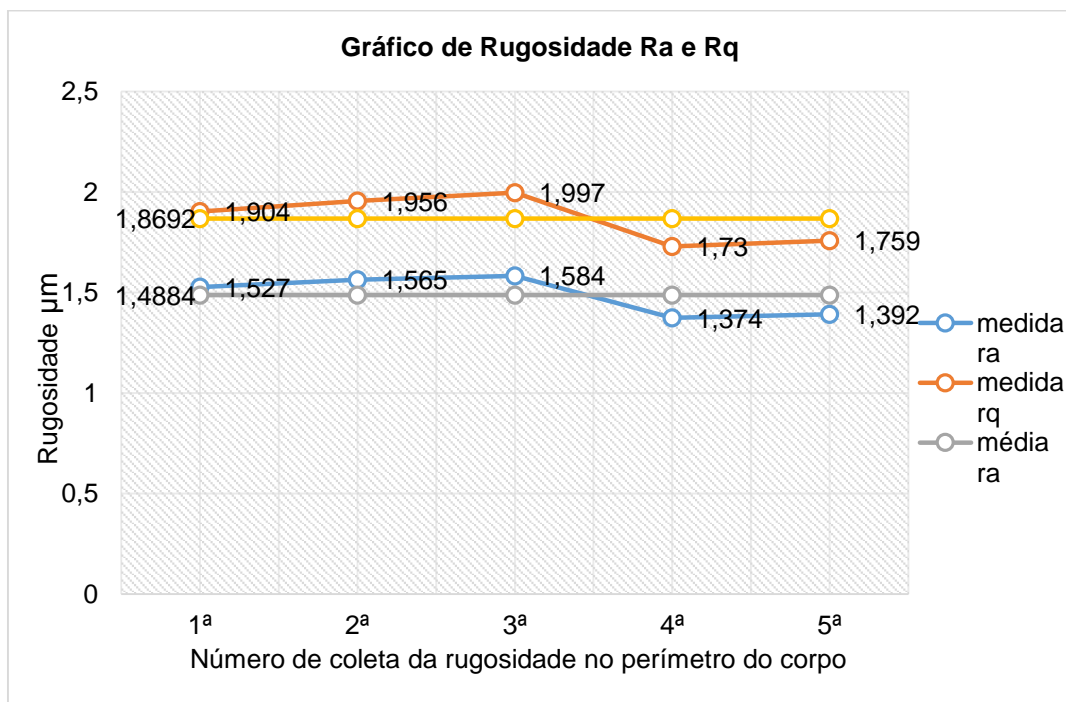
Utilizando o mesmo procedimento para análise das amostras usinadas do aço SAE 1020, opta-se pela textura superficial das seguintes amostras:



Quadro 10 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1045 com f de 0,117 mm.

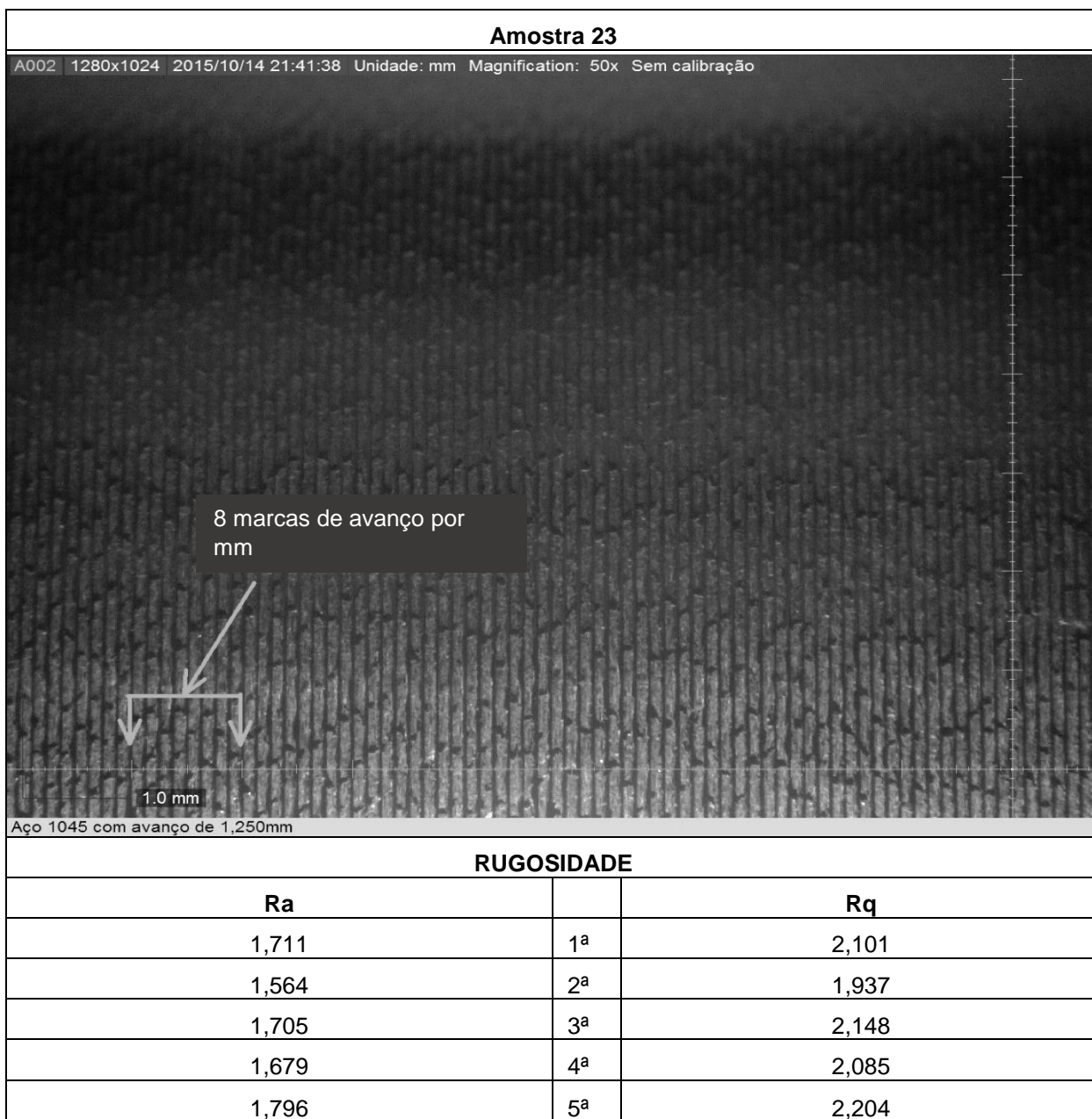
Fonte: Autoria própria.

Segundo os dados colhidos para a amostra 18 a figura do gráfico gerado é:



**Figura 14 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1045 com f de 0,117 mm.  
Fonte: Autoria própria.**

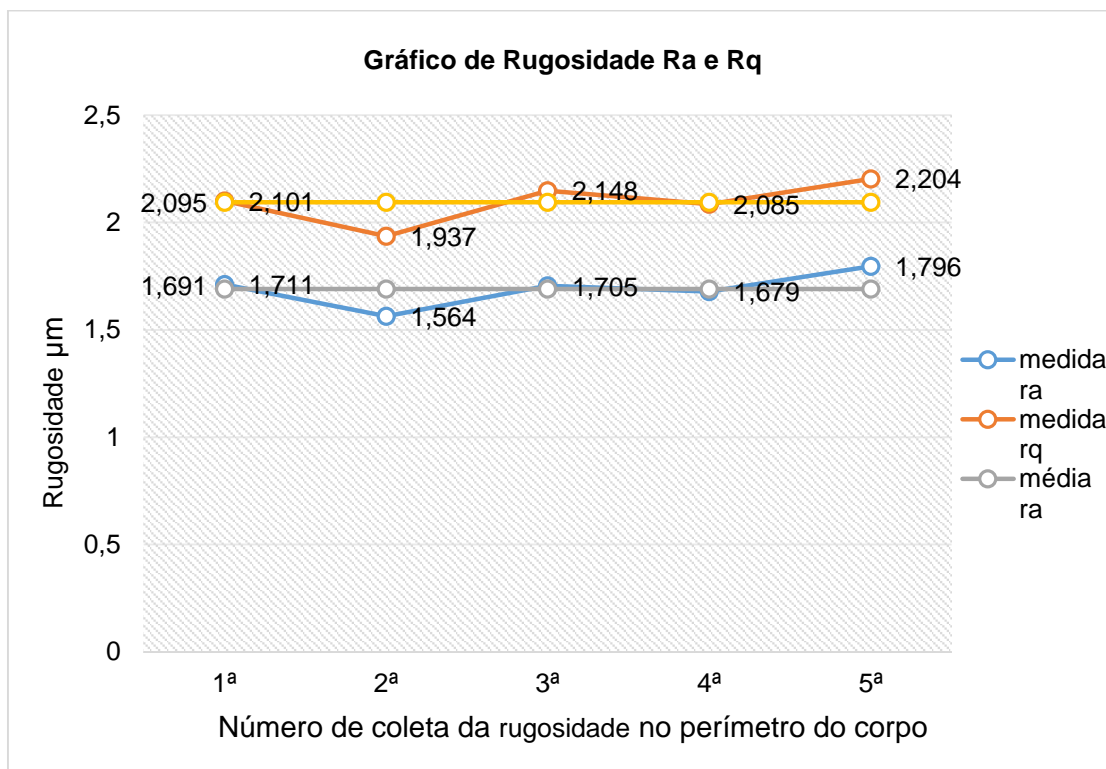
Conforme o quadro 11 abaixo, tem-se o resultado das medições dos dados para um  $f = 0,125$  mm e 1250 rpm:



Quadro 11 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1045 com  $f$  de 0,125 mm.

Fonte: Autoria própria.

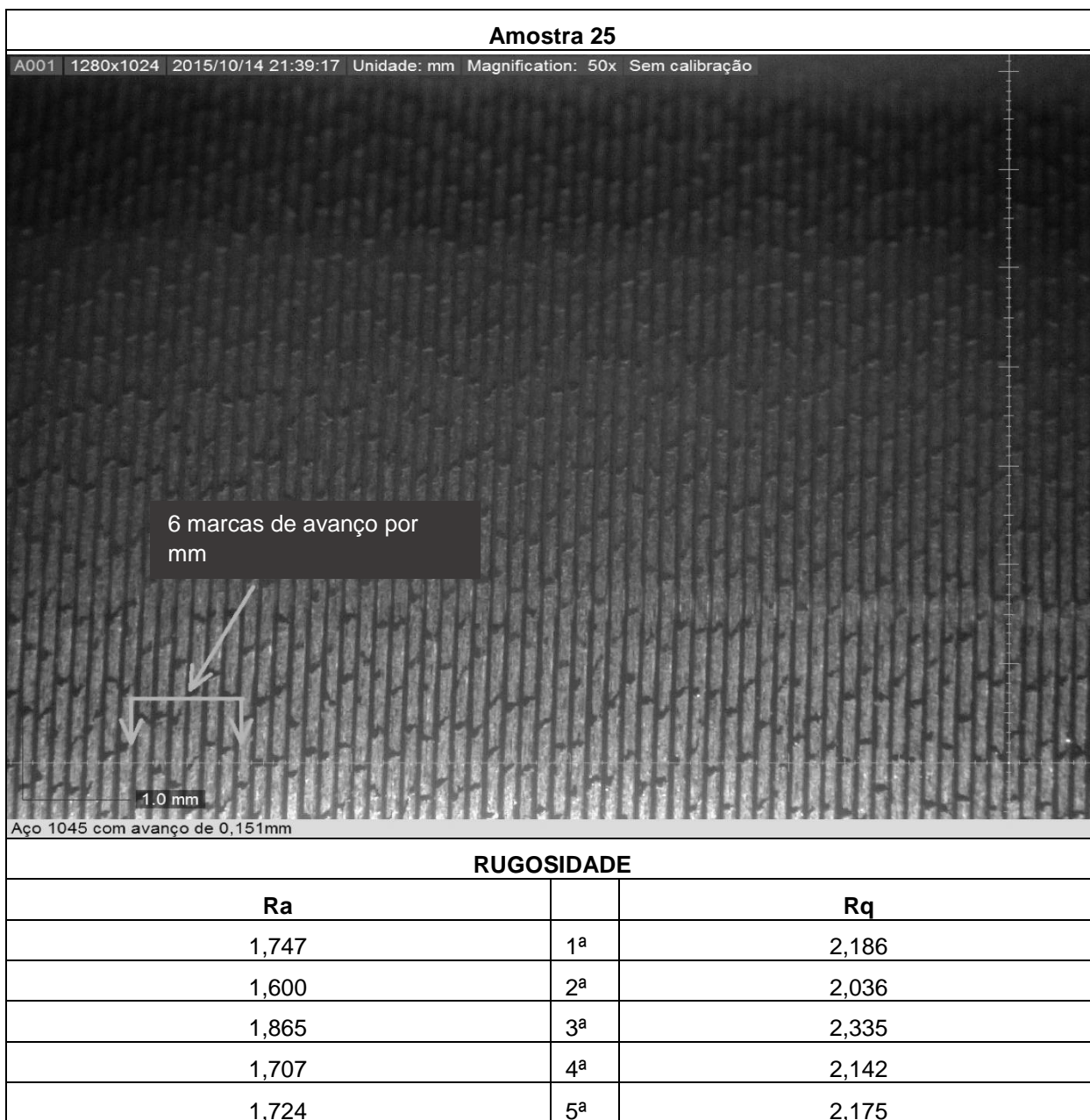
O gráfico de rugosidade para o quadro 11 é:



**Figura 15 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1045 com f de 0,125 mm.  
Fonte: Autoria própria.**

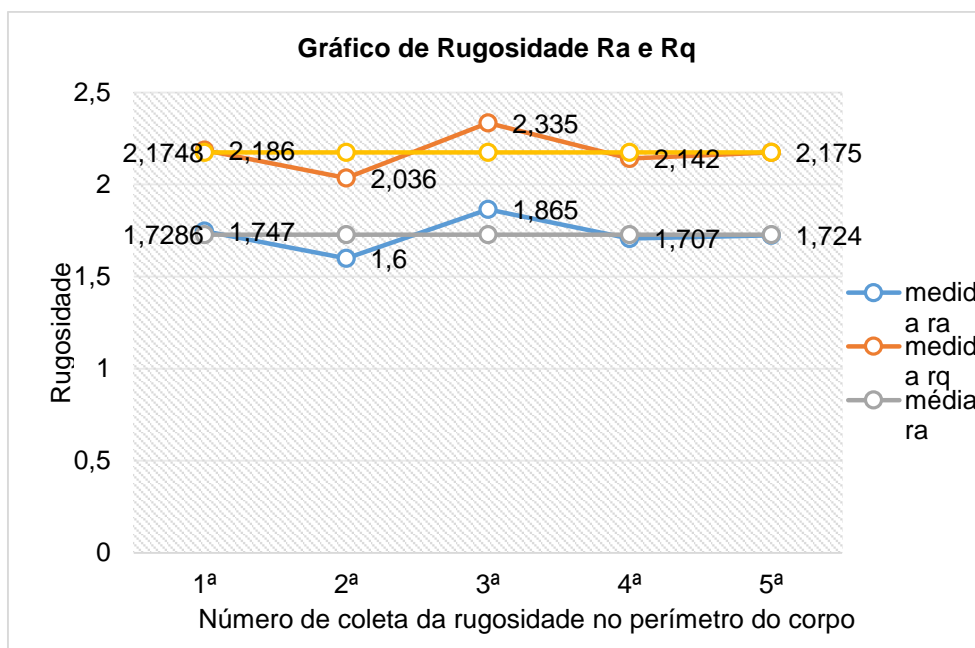


Para completar a proposta dos dados de rugosidade no ensaio preliminar, ensaiou-se o material com um  $f = 0,151$  mm:



Quadro 12 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1045 com  $f$  de 0,151 mm.  
Fonte: Autoria própria.

Finalizando esta etapa do ensaio de acordo com os dados propostos pelo quadro 12, traça-se o gráfico conforme a figura 15 com as rugosidade:



**Figura 16 - Medidas de rugosidade com amostra de aço 1045 com f de 0,151 mm.**  
**Fonte: Autoria própria.**

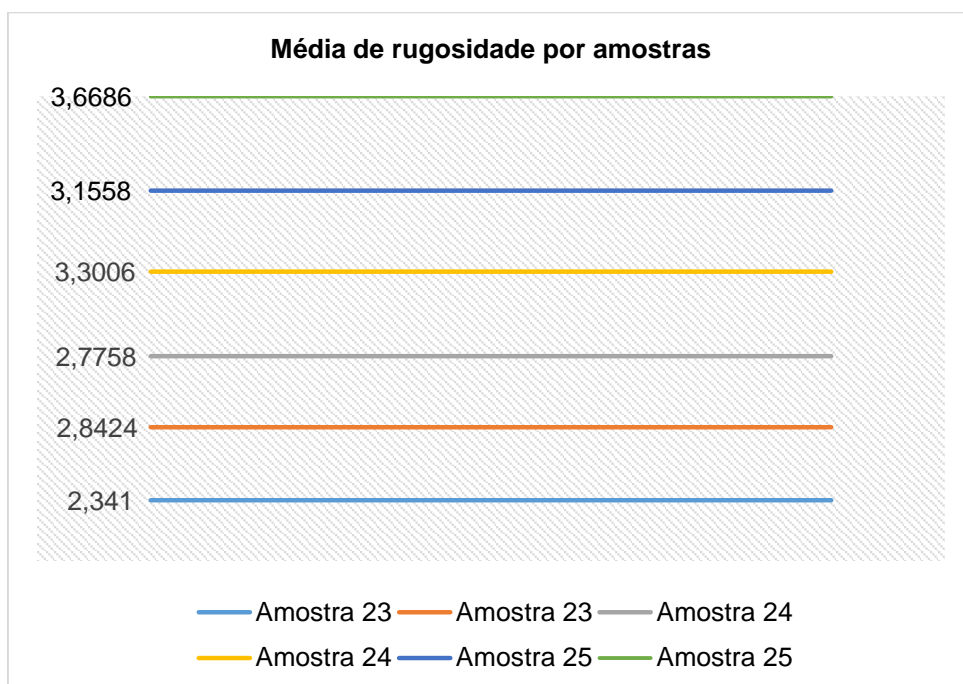
### 3.5.2.1 Seleção Definitiva dos Parâmetros de Usinagem

Conforme propôs-se no início deste trabalho em analisar o acabamento superficial devido aos parâmetros de usinagem, segue neste capítulo a análise definitiva para concluir quais foram os mais favoráveis parâmetros, onde geraram resultados mais satisfatórios para posterior emprego em laboratório sobre as amostras que serão utilizadas no trabalho conclusivo.

Seguem as avaliações dos gráficos e dados, referentes à rugosidade, com o fim de selecionar as condições uteis na usinagem do SAE 1020 e no SAE 1045.

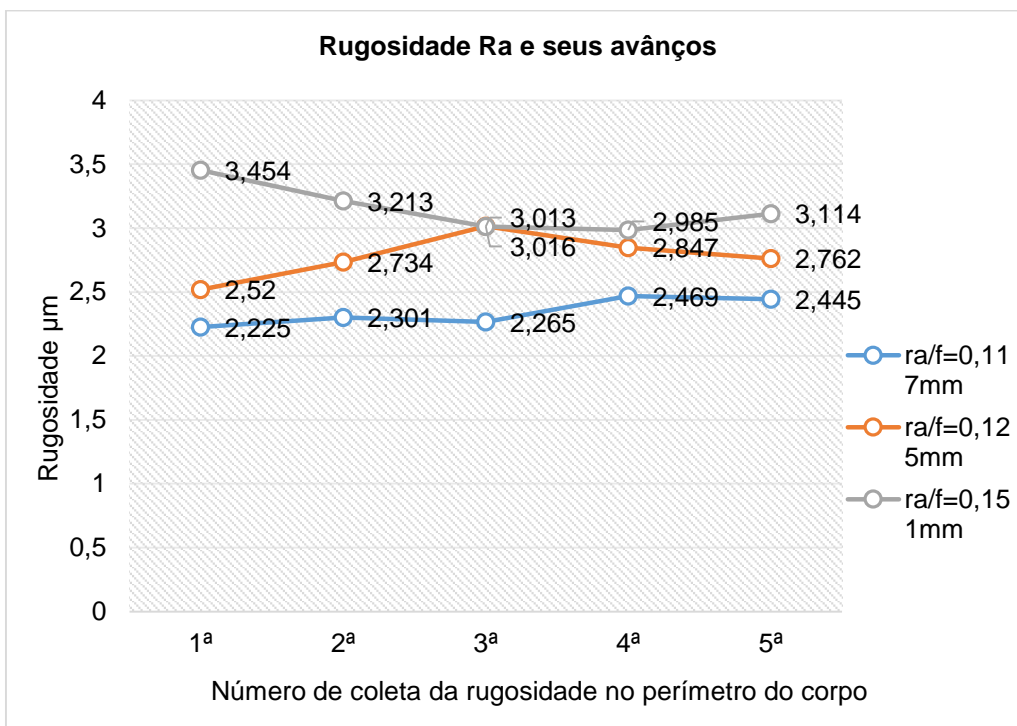
### 3.5.2.2 Análise Para Aço SAE 1020

Analisando as figuras de gráficos para o SAE 1020, 9, 10 e 11, conclui-se que quanto maior for o avanço (f), maior será a rugosidade apresentada, isso permanecendo a velocidade de corte ( $V_c$ ), e a profundidade de corte ( $a_p$ ), fixas. Observando pela média das medições de rugosidade,  $R_a$  apresentou um valor de 2,84 para um  $f = 0,117$  mm, enquanto os outros avanços apresentaram  $R_a = 3,3$  e 3,66, para avanços de 0,125 mm e 0,151 mm, como demonstra a figura 16 do gráfico:

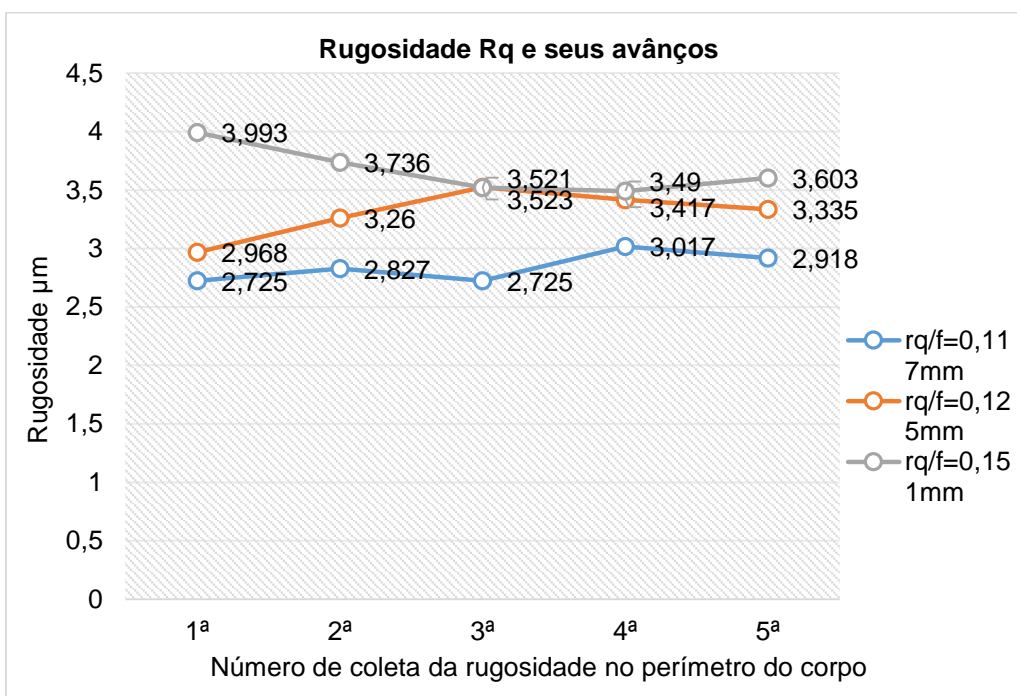


**Figura 17 - Média de rugosidade  $R_a$  e  $R_q$  com os respectivos avanços**  
Fonte: Autoria própria.

Pode-se também avaliar as rugosidades Ra e Rq nas figura 17 e 18:



**Figura 18 - Rugosidade Ra com os respectivos avanços**  
 Fonte: Autoria própria.

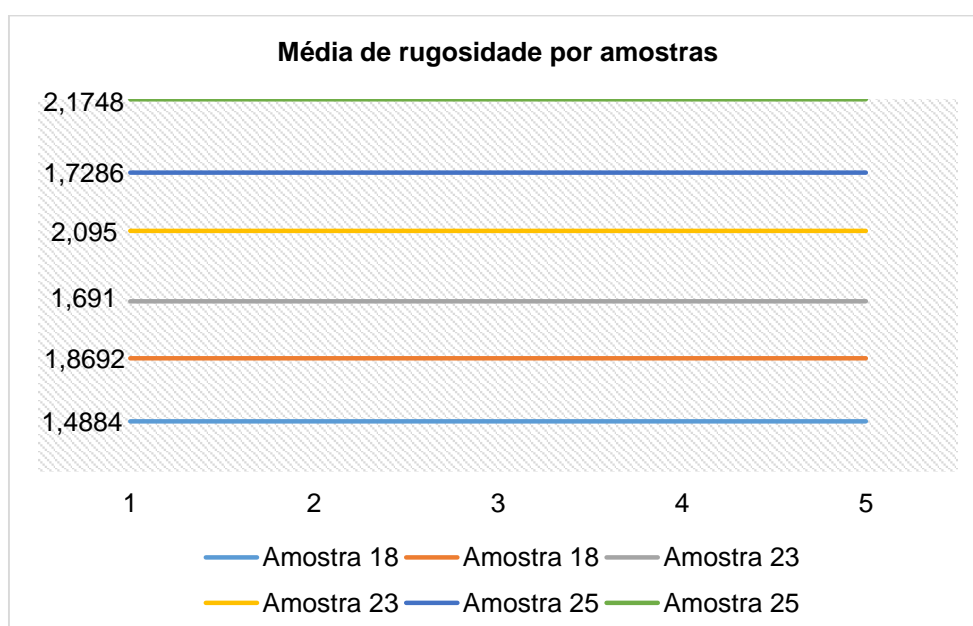


**Figura 19 - Rugosidade Rq com os respectivos avanços**  
 Fonte: Autoria própria.

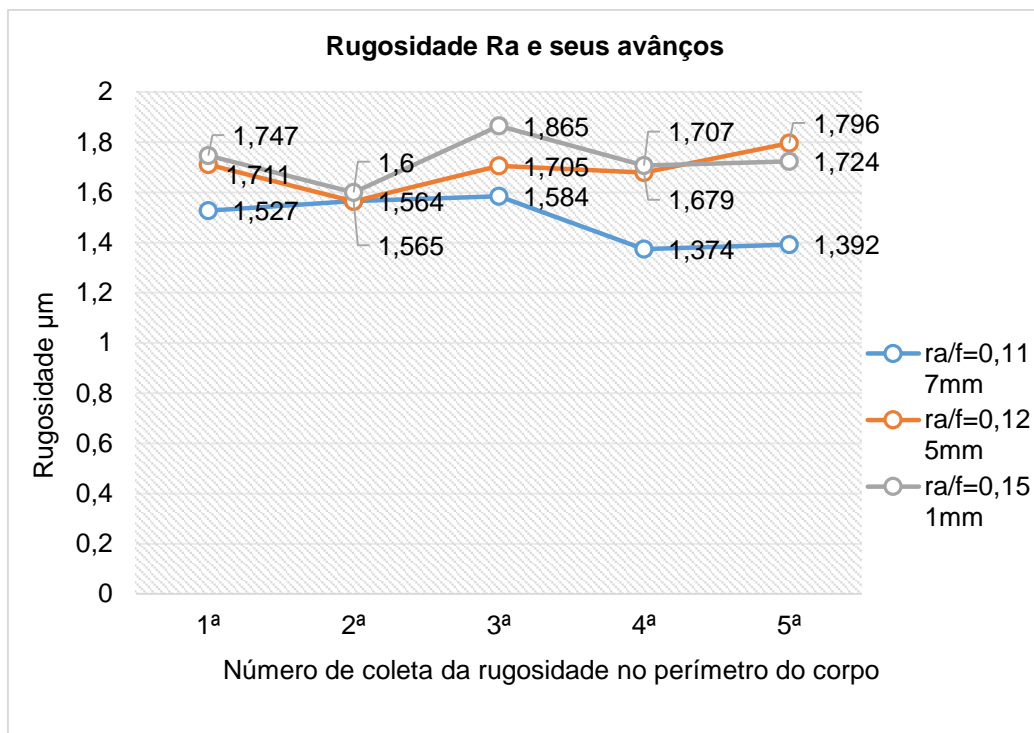
Conclui-se então, para o Aço SAE 1020, conforme os dados e observações feitas nas figuras de gráficos, que as médias das rugosidades Ra e Rq. Foram as mais representativas quando utilizou-se uma profundidade de corte ( $a_p$ ), de 1 mm, uma velocidade de corte ( $V_c$ ), de 117,8 m/min e um avanço ( $f$ ), de 0,117 mm.

### 3.5.2.3 Análise Para o Aço SAE 1045

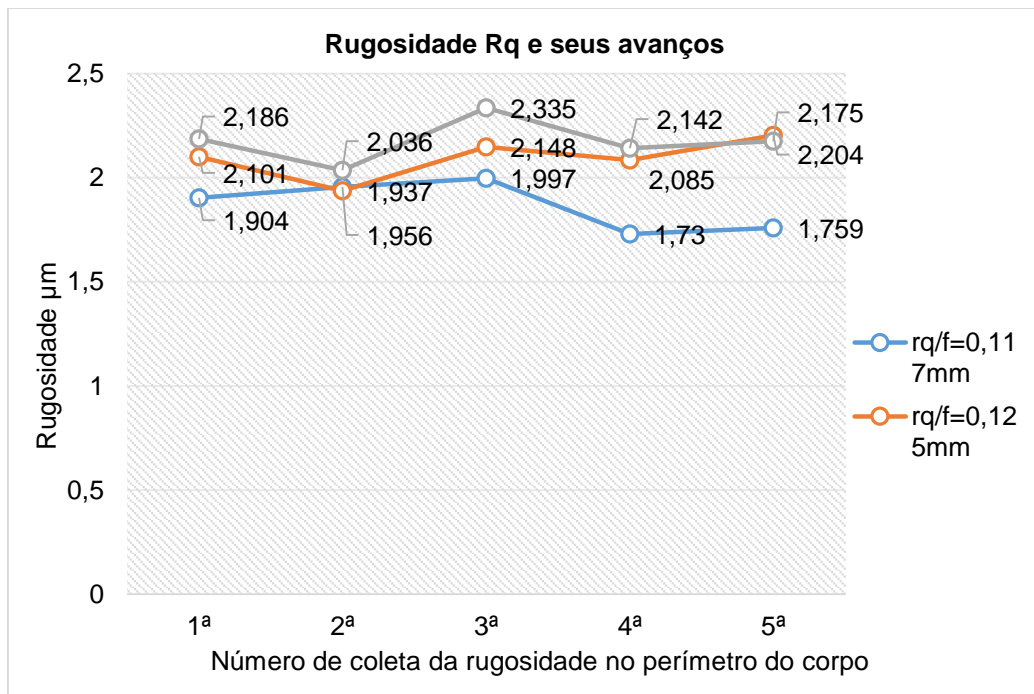
Nos ensaios efetuados pode-se observar que para o aço 1045 apresentou um padrão de acabamento na formação das marcas de avanço, e criando uma boa superfície conforme as velocidades de corte foram aumentando como a do aço 1020, com isso, obtive-se uma boa superfície em duas velocidades diferentes. Portanto, com as figuras dos gráficos que forem apresentados posteriormente, a intenção é sanar a dúvida de qual das velocidades foi a melhor a ser aplicada em laboratório como parâmetro definitivo para usinagem do aço.



**Figura 20 - Média de rugosidade Ra e Rq com os respectivos avanços**  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 21 - Rugosidade Ra com os respectivos avanços**  
 Fonte: Autoria própria.



**Figura 22 - Rugosidade Rq com os respectivos avanços**  
 Fonte: Autoria própria.

Como foi mencionado anteriormente, para os aços 1045 conseguiu-se resultados bons com duas velocidades de cortes ( $V_c$ ), diferentes, uma com o avanço ( $f$ ), de 0,117 mm e as outras duas com avanços de 0,125 mm e 0,151 mm respectivamente. Nota-se que a velocidade de corte com rotação de 1000 rpm, ou seja, para  $\Phi 30$  mm da peça, e portanto com velocidade de corte de 94,247 m/min, apresentou um acabamento superficial mais satisfatório após analisarmos as figuras dos gráficos apresentados acima. Portanto, em coerência com os gráficos, conclui-se que as condições melhores para se usinar um aço SAE 1045, considerando as informações da proposta, é velocidade de corte ( $V_c$ ), de 94,25 mm, avanço ( $f$ ), de 0,117 mm, e profundidade de corte ( $a_p$ ), de 1 mm.

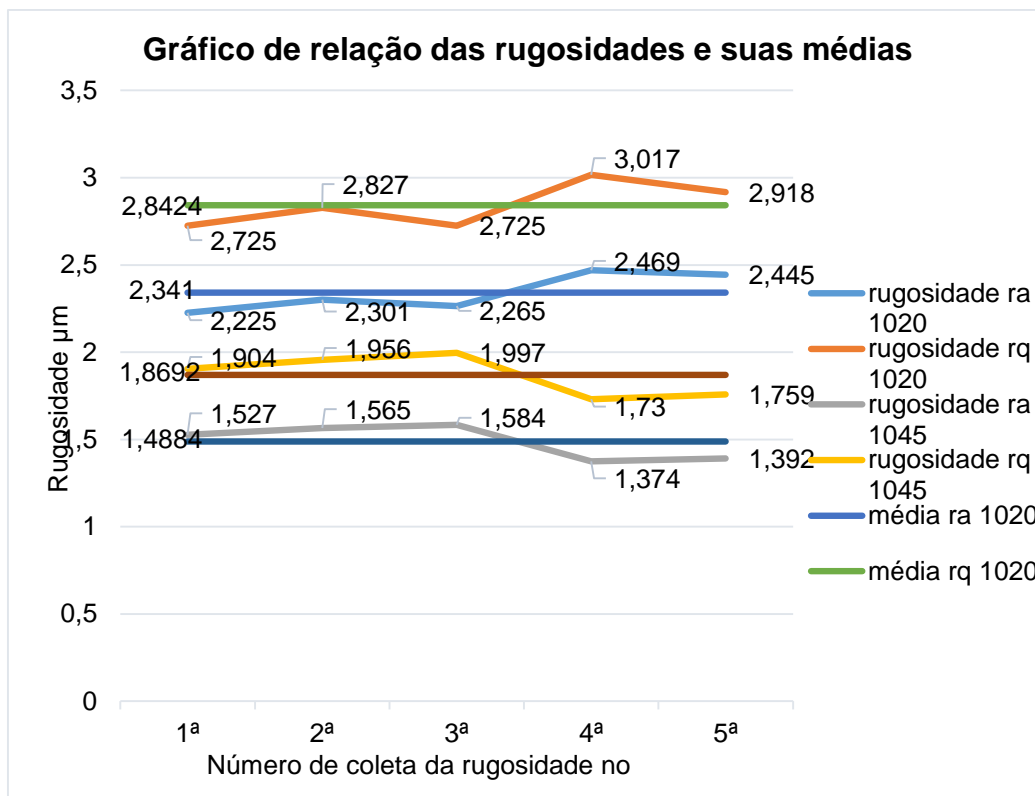
### 3.5.2.4 Conclusão da Análise Preliminar

Com base em dados, teorias e práticas laboratoriais, pode-se concluir que os parâmetros a serem adotados no processo de usinagem serão distintos para os materiais, utilizando um  $f$ , e uma  $V_c$ , para o aço SAE 1020, e uma  $f$ , e uma  $V_c$ , para o aço SAE 1045, como não foi variado o  $a_p$ , este parâmetro foi mantido como fixo para todos os materiais. Os parâmetros como referência estão descritos na Tabela 3 descrita a seguir:

**Tabela 3 - Parâmetros de usinagem conforme o material empregado**

<b>Material</b>	<b><math>V_c</math>[m/min]</b>	<b><math>f</math>[mm]</b>	<b><math>a_p</math>[mm]</b>	<b>rpm</b>
SAE 1020	117,8	0,117	1	1250
SAE 1045	94,25	0,117	1	1000

Fonte: Autoria própria.



**Figura 23 - Rugosidade Rq com os respectivos avanços**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 3.5.3 Equipamento de Metodologia de Medição

Para obtenção das medidas (diâmetro e comprimento), foi utilizado um paquímetro analógico, Vernier Caliper com aproximação centesimal, um microscópio digital Dino Lite AM413TL, permite a visualização das áreas com maior distância do objeto, até 15 cm, ampliando em até 90 vezes a imagem (usado para analisar a superfície dos materiais), e rugosímetro SJ-210, Mitutoyo (utilizado para medir as rugosidades Ra e Rq da superfície). Cada corpo de prova foi dividido em 5 posições diferentes em seu perímetro (mais ou menos 72° entre coletas), para fornecer a média das rugosidades colhidas, conforme Anexo C.



## 4 RESULTADOS

Neste capítulo decorre-se as apresentações dos resultados obtidos na coleta das rugosidades pós-torneamento dos AÇOS SAE 1020 e 1045. As apresentações serão feitas através de gráficos e tabelas aplicando-se a análise de variância e dados suplementares das variáveis, propostas em percentuais.

### 4.1 MONTAGEM DA TABELA ANOVA PARA SEQUÊNCIA DE USINAGEM

Aplicando-se a teoria estatística da análise de variância na formação de grupos de variáveis de usinagem, confere-se as seguintes combinações para cada torneamento. A tabela 4, apresenta a sequência a ser seguida para coleta de dados respeitando a aleatoriedades de variações do material, ferramenta e aplicação ou não de fluido refrigerante no corte.

**Tabela 4 - Combinações entre Grupos de Variáveis em Conformidade com ANOVA**

(continuação)

<b>Ferramenta</b>	<b>Fluido</b>	<b>Material</b>	<b>Réplica</b>	<b>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Aleatorização</b>
<b>Rev. PVD</b>	Com	1020	1		1
<b>Rev. PVD</b>	Com	1020	2		
<b>Rev. PVD</b>	Com	1020	3		
<b>Rev. PVD</b>	Com	1045	1		6
<b>Rev. PVD</b>	Com	1045	2		
<b>Rev. PVD</b>	Com	1045	3		
<b>Rev. PVD</b>	Sem	1020	1		5
<b>Rev. PVD</b>	Sem	1020	2		
<b>Rev. PVD</b>	Sem	1020	3		
<b>Rev. PVD</b>	Sem	1045	1		7
<b>Rev. PVD</b>	Sem	1045	2		
<b>Rev. PVD</b>	Sem	1045	3		
<b>Rev. CVD</b>	Com	1020	1		3
<b>Rev. CVD</b>	Com	1020	2		

(conclusão)

<b>Ferramenta</b>	<b>Fluido</b>	<b>Material</b>	<b>Réplica</b>	<b>Rugosidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Aleatorização</b>
<b>Rev. CVD</b>	Com	1020	3		
<b>Rev. CVD</b>	Com	1045	1		4
<b>Rev. CVD</b>	Com	1045	2		
<b>Rev. CVD</b>	Com	1045	3		
<b>Rev. CVD</b>	Sem	1020	1		2
<b>Rev. CVD</b>	Sem	1020	2		
<b>Rev. CVD</b>	Sem	1020	3		
<b>Rev. CVD</b>	Sem	1045	1		8
<b>Rev. CVD</b>	Sem	1045	2		
<b>Rev. CVD</b>	Sem	1045	3		

Na tabela 5, são apresentados os resultados das rugosidades Ra e Rq coletadas através de rugosímetro, medido na superfície dos corpos de prova dos Aços SAE 1020 e SAE 1045, usinados conforme os parâmetros já mencionados no capítulo 3, onde trata-se da análise preliminar para cada material. Os materiais foram submetidos a usinagem com três réplicas mantendo um mesmo grupo de variável e obedecendo a aleatorização entre as combinações destas variáveis para cada grupo.

**Tabela 5 - Rugosidades Ra e Rq dos Aços SAE 1020 e SAE 1045 e grupos de variáveis.**

	<b>1020/CVD/C. fluido</b>	<b>1020/CVD/S. fluido</b>	<b>1020/PVD/C. fluido</b>	<b>1020/PVD/S. fluido</b>
<b>Rugosidade Ra</b>	1,96	1,07	1,36	2,03
	1,8	1,72	1,47	1,52
	1,83	1,73	1,45	1,62
	<b>1020/CVD/C. fluido</b>	<b>1020/CVD/S. fluido</b>	<b>1020/PVD/C. fluido</b>	<b>1020/PVD/S. fluido</b>
<b>Rugosidade Rq</b>	2,47	1,95	1,65	2,61
	2,23	2,01	1,74	1,92
	2,4	1,92	1,73	1,74
	<b>1045/CVD/C. fluido</b>	<b>1045/CVD/S. fluido</b>	<b>1045/PVD/C. fluido</b>	<b>1045/PVD/S. fluido</b>
<b>Rugosidade Ra</b>	1,55	1,27	1,97	1,67
	1,63	1,39	2,15	1,73
	1,62	1,37	2,04	1,7
	<b>1045/CVD/C. fluido</b>	<b>1045/CVD/S. fluido</b>	<b>1045/PVD/C. fluido</b>	<b>1045/PVD/S. fluido</b>
<b>Rugosidade Rq</b>	1,88	1,55	2,39	2,07
	1,96	1,74	2,58	2,15
	1,9	1,68	2,57	2,1

#### 4.1.2 Tratamento de dados utilizando softwares

Segundo as rugosidades coletadas utilizou-se os softwares “R” (ferramenta estatística), e o Excel para gerar as tabelas principais que fornecem dados aplicando técnica da ANOVA.

Na tabela 6, mostra-se os valores médios de rugosidades e também os desvios padrão contidos nas médias conferindo uma outra disposição visual para análise dos dados.

**Tabela 6 - Média e Desvio Padrão (D.P.) para Ra e Rq segundo ferramenta, fluido e material.**

Ferramenta	Fluído	Material	Ra	Rq
			Média (D.P.)	Média (D.P.)
PVD	Com	1020	1,43 (0,06)	1,71 (0,05)
		1045	2,05 (0,09)	2,51 (0,11)
	Sem	1020	1,72 (0,27)	2,09 (0,46)
		1045	1,70 (0,03)	2,11 (0,04)
CVD	Com	1020	1,86 (0,09)	2,37 (0,12)
		1045	1,60 (0,04)	1,91 (0,04)
	Sem	1020	1,51 (0,38)	1,96 (0,05)
		1045	1,34 (0,06)	1,66 (0,10)

As tabelas 7 e 8 a seguir, retorna os dados tratados no Excel seguindo a técnica de análise de variância, para isso foi adotado um “ $\alpha$ ” = 0,05 que retorna 95% de probabilidade de acerto na afirmação sobre a tese do “ $H_0$ ”, ou seja, de todas as médias amostrais serem a mesma.

Tabela 7 - ANOVA para rugosidade Ra.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
<b>Entre grupos</b>	1,148995833	7	0,16414226	5,42843363	<b>0,0024645</b>	2,6571966
<b>Dentro dos grupos</b>	0,4838	16	0,0302375			
<b>Total</b>	1,632795833	23				

Tabela 8 - ANOVA para rugosidade Rq.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-P</i>	<i>F crítico</i>
<b>Entre grupos</b>	1,85458333	7	0,26494048	8,3151189	<b>0,00024403</b>	2,6571966
<b>Dentro dos grupos</b>	0,5098	16	0,0318625			
<b>Total</b>	2,36438333	23				

Anova transmite dados importantes sobre o comportamento das variações das médias dentro das amostras coletadas, mas o valor na qual deve-se dar maior importância nesta análise para posteriormente aprofundar nas causas do processo é o “**valor-p**”, esse dado indica se entre as variáveis de usinagem aplicadas houve ou não alguma variação “grande” dos dados e isto é importante porque necessita-se de uma combinação de variáveis na qual atenda a necessidade de se ter o menor valor possível de rugosidade. Sendo o valor de rugosidade que a ANOVA trata, então fica claro que se houver em um grupo de variáveis que retornou um valor médio “pequeno” de rugosidade e outro com um valor médio “grande”, de fato há evidências que um grupo obteve melhor resultado que outro no acabamento superficial, e essa análise estatística permite dizer parcialmente isso ao avaliar o “**valor-p**”, no qual, se retornar um valor menor que 0,05 quer dizer que descarta-se a hipótese de  $H_0$  (cuja afirmação é dizer que todas as combinações retornaram a mesma média, ou seja, independente das variáveis que forem utilizadas o resultado da rugosidade sempre retornará algo insignificante no que diz respeito a variação de sua média, portanto todas elas serão boas para usinar), e inicia-se a hipótese  $H_1$  (afirma que existe diferença entre as médias amostrais de rugosidade e portanto confirma-se a diferença de resultados entre os grupos de variáveis), e assim dá-se sequência a outro processo de avaliação onde se torna necessário uma pergunta, “qual das combinações retorna o melhor resultado, ou qual das variáveis interfere mais na obtenção de um acabamento

superficial favorável?”. Para isso aplica-se uma técnica denominada “Teste Tukey”, que efetua cálculos de dois tratamentos comparando em todos os grupos de variáveis e retorna dados desses cálculos para comparação de qual foi a variável que mais influenciou nos resultados do torneamento. No entanto se este valor  $P > 0,05$ , a hipótese  $H_0$  estará correta, e sendo assim não precisa preocupar-se com as combinações de variáveis a aplicar, pois sempre retornará resultados aceitáveis já que a hipótese desconsidera a variação dada pelas amostras.

Com a avaliação de ambos os parâmetros de Ra e Rq, pode-se concluir que há variações em suas médias já que o “**valor-p**” retorna valor calculado abaixo de 0,05, então conclui-se que entre os grupos de combinações de variáveis de usinagem produz influência nos resultados do acabamento superficial, segundo as tabelas 7 e 8.

Considerando o valor alfa “ $\alpha$ ” igual a 0,05 ainda, pode-se identificar na tabela 9 os principais resultados nos quais apresentaram uma relevância no processo de torneamento conforme foram aplicados onde seguem valores de  $P < 0,05$  em negrito.

**Tabela 9 - Tabela de ANOVA para Ra.**

Fonte de Variação	G.L.	Valor P
Ferramenta	1	0,054
<b>Fluído</b>	<b>1</b>	<b>0,03</b>
Material	1	0,54
Ferramenta*Fluído	1	0,07
<b>Ferramenta*Material</b>	<b>1</b>	<b>&lt;0,01</b>
Fluído*Material	1	0,07
<b>Ferramenta*Fluído*Material</b>	<b>1</b>	<b>0,02</b>

A tabela 9 ainda expõe, sempre considerando o valor P como referência de análise, que na aplicação do fluido como uma variável de primeira ordem houve interferência na performance do acabamento superficial, já variáveis como ferramenta e material também de primeira ordem, foram irrelevantes considerando os 95% de afirmação que foi atribuído ao valor P. Também pode-se ver que na interação de

segunda ordem da Ferramenta x material, houve um expressivo resultado se comparadas as médias obtidas nesta categoria, portanto ao avaliar somente o tipo de ferramenta aplicada e o material utilizado em todo o processo de usinagem, foi uma das causas de se obter um acabamento superficial satisfatório.

Na avaliação de terceira ordem onde os cálculos para ANOVA leva em consideração todas as variáveis juntas, ou seja, Ferramenta x Fluido x Material na qual para a experiência se torna de maior importância já que busca-se tanto parâmetros quanto as variáveis de torneamentos com maior eficiência no retorno de dados sobre a rugosidade, portanto nesta categoria observa-se que a interação de todas as variáveis foram também responsáveis pelas interferências nos resultados, por apresentar variações a baixo dos 95% sobre  $H_0$  ou valor  $P < 0,05$ .

**Tabela 10 - Comparações de Ra segundo Fluido.**

	Fluido [Média (D.P.)]		Valor p
	Com	Sem	
	1,74 (0,26)	1,57 (0,26)	<b>0,03</b>

A tabela 10 é uma extensão da tabela 9 e tem a ideia de mostrar separadamente de outras variáveis de processo a importância que teve a aplicação do fluido na obtenção de valores de rugosidade e admite que há variação o suficiente quando se aplica um fluido no torneamento tratado neste trabalho.

**Tabela 11 - Comparações de Ra segundo Ferramenta com Material fixo independente de Fluido.**

Material	Ferramenta [Média (D.P.)]		Valor p
	PVD	CVD	
1020	1,57 (0,24)	1,68 (0,31)	0,70
1045	1,88 (0,20)	1,47 (0,15)	<b>&lt;0,01</b>

Aqui a tabela 11 propõe comparar variações de segunda ordem onde varia a

ferramenta mantendo o material fixo, com isso pode-se ver que o melhor resultado foi obtido com média de  $R_a=1,47 \mu\text{m}$  para aço SAE 1045 com o revestimento CVD sendo independente de fluido nesta instancia constata-se também o fato da ferramenta ter ocasionado essa maior variação na média comparando o valor P para o teste.

**Tabela 12 - Comparações de  $R_a$  segundo Material com Ferramenta fixa independente de Fluido.**

Ferramenta	Material [Média (D.P.)]		Valor p
	1020	1045	
PVD	1,57 (0,24)	1,88 (0,20)	<b>0,04</b>
CVD	1,68 (0,31)	1,47 (0,15)	0,19

Na tabela 12 fixando-se o revestimento e variando o material, sendo também de segunda ordem, observa-se que mesmo com valores médios menores para o revestimento CVD, uma maior variação é encontrada nas médias comparadas para o material SAE 1045 e usando a ferramenta revestida em PVD, nesta tabela procura mostrar que pela variação do Aço produz influência considerável no acabamento.

**Tabela 13 - Comparações de  $R_a$  segundo Material com Ferramenta e Fluido fixos.**

Ferramenta	Fluido	Material [Média (D.P.)]		Valor p
		1020	1045	
PVD	Com	1,43 (0,06)	2,05 (0,09)	<b>0,01</b>
	Sem	1,72 (0,27)	1,70 (0,03)	0,99
CVD	Com	1,86 (0,09)	1,60 (0,04)	0,60
	Sem	1,51 (0,38)	1,34 (0,06)	0,93

A tabela 13, que se refere a uma variação de terceira ordem, fixa-se a ferramenta e o fluido variando o material, portanto o aço, isto mostra que dentre as médias analisadas, o fato de se trocar o aço utilizando revestimento PVD e aplicando fluido na usinagem gera interferência no acabamento superficial. Novamente o teste retorna como o fator principal de contribuição na obtenção de valores de rugosidades

com grande variação o tipo de material usado na usinagem.

**Tabela 14 - Tabela de ANOVA para Rq.**

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Valor P
Ferramenta	1	0,09
<b>Fluído</b>	<b>1</b>	<b>0,03</b>
Material	1	0,82
<b>Ferramenta*Fluído</b>	<b>1</b>	<b>0,04</b>
<b>Ferramenta*Material</b>	<b>1</b>	<b>&lt;0,01</b>
<b>Fluído*Material</b>	<b>1</b>	<b>0,04</b>
<b>Ferramenta*Fluído*Material</b>	<b>1</b>	<b>&lt;0,01</b>

O mesmo que a tabela 9, a tabela 14 aborda as variáveis tratadas no processo de torneamento segundo teste da ANOVA, como mostra os dados em negrito.

Pode-se também concluir que o parâmetro utilizado para medir a rugosidade altera a interpretação dos resultados, pois comparando essas duas tabelas observa-se que os valores destacados para segunda ordem aumentaram com relação aos dados gerados pelo parâmetro Ra onde há somente Ferramentas x material como ponto principal de variação.

**Tabela 15 - Comparações de Rq segundo Fluído.**

Fluído [Média (D.P.)]		Valor p
Com	Sem	
2,12 (0,35)	1,95 (0,28)	<b>0,03</b>

Como na tabela 8, novamente a 15 aparece a aplicação do fluido como uma das causas de variação das médias de rugosidade, isto permite observar a concordância em avaliar o acabamento por meio dos parâmetros Ra e Rq conferindo que inicialmente permite as mesmas conclusões sobre os resultados.



**Tabela 16 - Comparações de Rq segundo Fluido com Ferramenta fixa independente de Material.**

Ferramenta	Fluido [Média (D.P.)]		Valor p
	Com	Sem	
PVD	2,11 (0,45)	2,10 (0,29)	0,99
CVD	2,14 (0,26)	1,81 (0,18)	<b>0,03</b>

Analisando o gráfico 16, onde tem-se como fator de interferência o fluido é fácil observar que onde há variação maior é na qual se aplica ferramenta CVD sendo ela torneada sem a utilização de fluido. Lembrando que são analisados as variações de segunda ordem neste momento e não leva em consideração o material, portanto atendo-se somente ao revestimento e o fluido.

**Tabela 17 - Comparações de Rq segundo Ferramenta com Material fixo independente de Fluido.**

Material	Ferramenta [Média (D.P.)]		Valor p
	PVD	CVD	
1020	1,90 (0,36)	2,16 (0,24)	0,09
1045	2,31 (0,23)	1,78 (0,16)	<b>&lt;0,01</b>

Ainda mantendo a análise em segunda ordem, mas avaliando na tabela 17 com material fixo, nota-se novamente o material SAE 1045 sendo usinado com revestimento CVD apresentando variação maior, desconsiderando a aplicação de fluido.

**Tabela 18 - Comparações de Rq segundo Material com Ferramenta fixa independente de Fluido.**

Ferramenta	Material [Média (D.P.)]		Valor p
	1020	1045	
PVD	1,90 (0,36)	2,31 (0,23)	<b>0,01</b>
CVD	2,16 (0,24)	1,78 (0,16)	<b>0,01</b>

Na tabela 18 tanto o CVD quanto o PVD mesmo com a variação dos materiais usinados retornam dados de influência no acabamento superficial, portanto a tabela vem a mostrar que o material é fator que afeta as médias, novamente desconsiderando a aplicação de fluido.

**Tabela 19 - Comparações de Rq segundo Fluido com Material fixo independente de Ferramenta.**

Material	Fluido [Média (D.P.)]		Valor p
	Com	Sem	
1020	2,04 (0,37)	2,02 (0,30)	0,99
1045	2,21 (0,34)	1,88 (0,26)	<b>0,02</b>

Na tabela 19 mostra novamente a ação da aplicação do fluido no que resulta uma variação maior quando não usado no torneamento do aço SAE 1045, ou seja os melhores resultados obtidos com relação a rugosidade foram proporcionados quando no torneamento do aço 45% C é efetuado sem a aplicação de fluido.

**Tabela 20 - Comparações de Rq segundo Ferramenta com Material e Fluido fixos.**

Fluido	Material	Ferramenta [Média (D.P.)]		Valor p
		PVD	CVD	
Com	1020	1,71 (0,05)	2,37 (0,12)	<b>0,01</b>
	1045	2,51 (0,11)	1,91 (0,04)	<b>0,01</b>
Sem	1020	2,09 (0,46)	1,96 (0,05)	0,98
	1045	2,11 (0,04)	1,66 (0,10)	0,10

Tendo em vista a tabela 20, cuja variação é de terceira ordem, avalia-se então a troca da ferramenta que permite afirmar que para este teste ambos os aços recebendo a aplicação de fluido foram os que mais variaram, sendo que para o aço 1020 a variação se deu com o revestimento PVD e para o aço 1045 se deu com o revestimento CVD.

**Tabela 21 - Comparações de Rq segundo Material com Ferramenta e Fluido fixos.**

Ferramenta	Fluido	Material [Média (D.P.)]		Valor p
		1020	1045	
PVD	Com	1,71 (0,05)	2,51 (0,11)	<b>&lt;0,01</b>
	Sem	2,09 (0,46)	2,11 (0,04)	0,99
CVD	Com	2,37 (0,12)	1,91 (0,04)	0,10
	Sem	1,96 (0,05)	1,66 (0,10)	0,46

Segundo a tabela 21, o principal fator a considerar é o material, tendo em vista que se trata de uma variação de terceira ordem também, fixa-se ferramenta e fluido onde visivelmente a variação das amostras é dada pelo revestimento PVD com a aplicação de fluido e usando o material SAE 1020, no qual apresenta o menor Rq=1,71  $\mu\text{m}$  que conseqüentemente abaixa a média gerando ai uma variação relevante para análise de influência dos grupos de variáveis de torneamento.

#### 4.1.3 Análise de dados utilizando Excel

As tablas 22 e 23, apresentam uma formação preliminar que antecede a ANOVA e procura demonstrar cálculos das médias de rugosidade em cada grupo de variáveis, contagem de amostras (réplicas), soma das rugosidades nos grupos e a variância, e também propõem dados suplementares aos quais não são necessários para análise de variância, mas são de suma importância na explicação dos fenômenos ocorridos, cujas informações são cálculos percentuais das relações entre cada variável contida nos grupos.

Tabela 22 - Resumo e adaptação de dados Ra, para ANOVA de fator único.

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
1020/CVD/C. fluido	3	5,59	1,863333333	0,007233333
1020/CVD/S. fluido	3	4,52	1,506666667	0,143033333
1020/PVD/C. fluido	3	4,28	1,426666667	0,003433333
1020/PVD/S. fluido	3	5,17	1,723333333	0,073033333
1045/CVD/C. fluido	3	4,8	1,6	0,0019
1045/CVD/S. fluido	3	4,03	1,343333333	0,004133333
1045/PVD/C. fluido	3	6,16	2,053333333	0,008233333
1045/PVD/S. fluido	3	5,1	1,7	0,0009
<i>Grupo</i>	<i>%Material</i>	<i>% c/s Fluido</i>	<i>% Ferramenta</i>	<i>Soma das %</i>
1020/CVD/C. fluido	-16,46%	-23,67%	-30,61%	-70,74%
1020/CVD/S. fluido	-12,16%	19,14%	12,57%	19,56%
1020/PVD/C. fluido	30,52%	17,21%	23,43%	71,17%
1020/PVD/S. fluido	-1,37%	-20,79%	-14,38%	-36,55%
1045/CVD/C. fluido	14,13%	-19,11%	22,08%	17,10%
1045/CVD/S. fluido	10,84%	16,04%	20,98%	47,86%
1045/PVD/C. fluido	-43,93%	-20,78%	-28,33%	-93,04%
1045/PVD/S. fluido	1,35%	17,21%	-26,55%	-7,99%

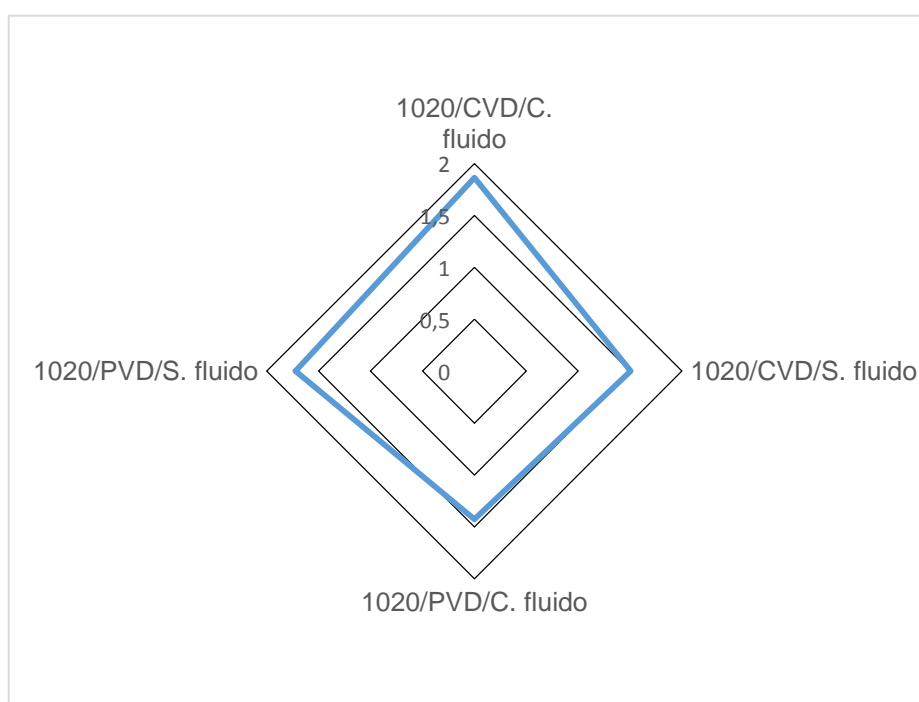
Tabela 23 - Resumo e adaptação de dados Rq, para ANOVA de fator único.

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
1020/CVD/C. fluido	3	7,1	2,366666667	0,015233333
1020/CVD/S. fluido	3	5,88	1,96	0,0021
1020/PVD/C. fluido	3	5,12	1,706666667	0,002433333
1020/PVD/S. fluido	3	6,27	2,09	0,2109
1045/CVD/C. fluido	3	5,74	1,913333333	0,001733333
1045/CVD/S. fluido	3	4,97	1,656666667	0,009433333
1045/PVD/C. fluido	3	7,54	2,513333333	0,011433333
1045/PVD/S. fluido	3	6,32	2,106666667	0,001633333
<i>Grupo</i>	<i>%Material</i>	<i>% c/s Fluido</i>	<i>% Ferramenta</i>	<i>Soma das %</i>
1020/CVD/C. fluido	-23,69%	-20,75%	-38,67%	-83,11%
1020/CVD/S. fluido	-18,31%	17,18%	6,22%	5,09%
1020/PVD/C. fluido	32,10%	18,34%	27,89%	78,32%
1020/PVD/S. fluido	0,79%	-22,46%	-6,63%	-28,30%
1045/CVD/C. fluido	19,15%	-15,49%	23,87%	27,53%
1045/CVD/S. fluido	15,48%	13,41%	21,36%	50,25%
1045/PVD/C. fluido	-47,27%	-19,30%	-31,36%	-97,93%
1045/PVD/S. fluido	-0,80%	16,18%	-27,16%	-11,78%

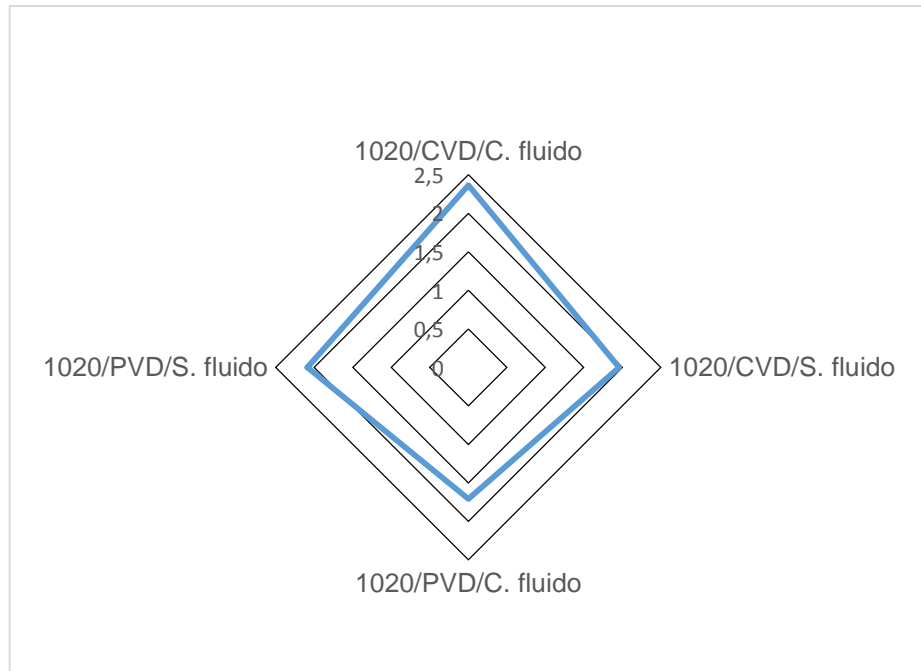
Nos gráficos acima é possível destacar os valores de relevância, sobretudo quando se torneia um aço SAE 1020 com revestimento PVD e aplicando o fluido e ainda na troca do material observa-se na usinagem do aço SAE 1045 que as melhores relações de acabamento superficial são adquiridas quando feitas com revestimento CVD e sem a aplicação de fluido. Esta avaliação pode ser feita tanto para o parâmetro de rugosidade Ra quanto para o Rq, ambos geram os mesmos resultados, porém não de forma quantitativa o que se explica já que para os parâmetros tratados são feitos cálculos de diferente forma.

#### 4.2 RESULTADOS GRÁFICOS DE RUGOSIDADE

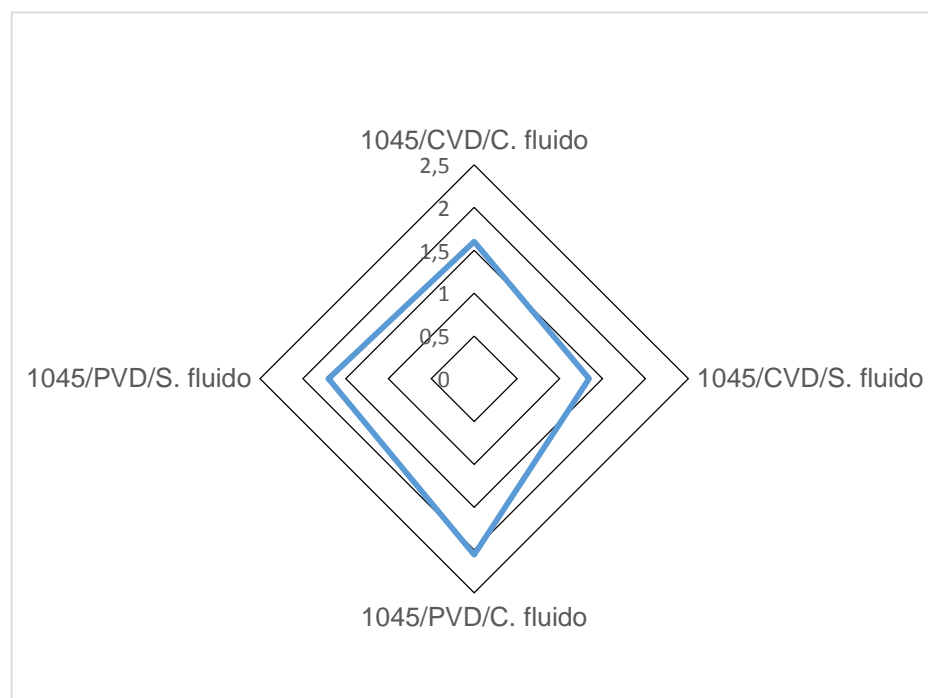
Serão apresentados os gráficos tipo radar com as rugosidades Ra e Rq comparando grupos de variáveis entre si. Os gráficos apresentam de forma separada os tipos de materiais e seus grupos de variáveis por não ser possível equiparar as análises tendo em vista a diferença de velocidade de corte usada para cada material.



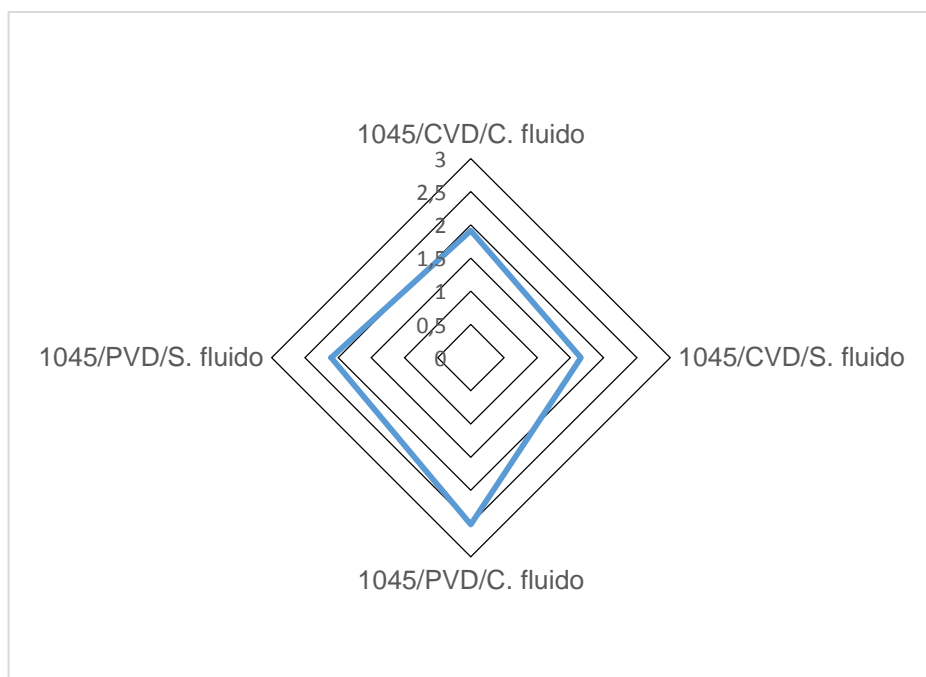
**Gráfico 1 - Média de Rugosidade Ra (Aço SAE 1020)**



**Gráfico 2 - Média de Rugosidade Rq (Aço SAE 1020)**



**Gráfico 3 - Média de Rugosidade Ra (Aço SAE 1045)**



**Gráfico 4 - Média de Rugosidade Rq (Aço SAE 1045)**

Como cada material foi tratado com parâmetro das velocidades de corte ( $V_c$ ) distintas, não é possível tratar a análise de maneira generalizada comparando todas as variáveis, pois a velocidade admitida para o material SAE 1045 não é a mesma que no SAE 1020, como já tratado no capítulo 3, então adotando qualquer das rugosidades ( $R_a$  ou  $R_q$ ), e observando o gráfico de radar no Aço 1020, pode-se afirmar que obteve melhor resultado de acabamento na usinagem a que utilizou como ferramenta o revestimento com PVD e ao mesmo tempo aplicando o fluido no processo. Este grupo foi o que apresentou uma menor média de rugosidade que realmente foi esperado para o processo devido a diminuição da temperatura no atrito entre peça e ferramenta, já que para este material usou-se a maior velocidade de corte, e o fluido agiu diretamente refrigerando o torneamento, além de eliminar o acúmulo de resíduo de cavaco na aresta de corte da ferramenta e impedindo a formação da aresta postiça de corte (APC).

No entanto ao observar o Aço 1045, encontra-se uma curiosidade em relação a teoria proposta estudada na usinagem, notou-se que sobre a escolha de qualquer medida de rugosidade os resultados para esse aço usando um intercambiável com revestimento CVD, os melhores acabamentos foram originados sem a utilização de fluido no processo, levando em consideração que para esse material foi desenvolvido

uma velocidade de corte menor do que o ensaio com aço 1020, ressalta-se que o esperado era quando houvesse a aplicação do fluido os resultados seriam os melhores possíveis. O que pode ter acontecido neste grupo de variáveis de processo é o simples fato de se trabalhar com velocidade mais baixa o que conforme a literatura proposta confere colaboração com formação da APC, por isso o resultado sem o fluido de corte foi mais satisfatório.

#### 4.3 RESULTADOS DAS RELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS

Nesta etapa serão fornecidas as relações entre as rugosidades, de cada variável contida no processo de usinagem, e essa relação nos permite avaliar qual o grau em percentagem obteve de melhora comparando com o grupo de variáveis equivalentes. Exemplo:

- Relacionando média de rugosidades de materiais diferentes:

$$Relação = \frac{1020, CVD, C. fluido}{1045, CVD, C. fluido}$$

$$Relação = \frac{1045, CVD, C. fluido}{1020, CVD, C. fluido}$$

\*Variando o Aço SAE

- Relacionando média de rugosidades com e sem fluido:

$$Relação = \frac{1020, CVD, C. fluido}{1020, CVD, S. fluido}$$

$$Relação = \frac{1020, CVD, S. fluido}{1020, CVD, C. fluido}$$

\*Variando o fluido

- Relacionando média de rugosidade com revestimento diferente:

$$Relação = \frac{1020, CVD, C. fluido}{1020, PVD, C. fluido}$$

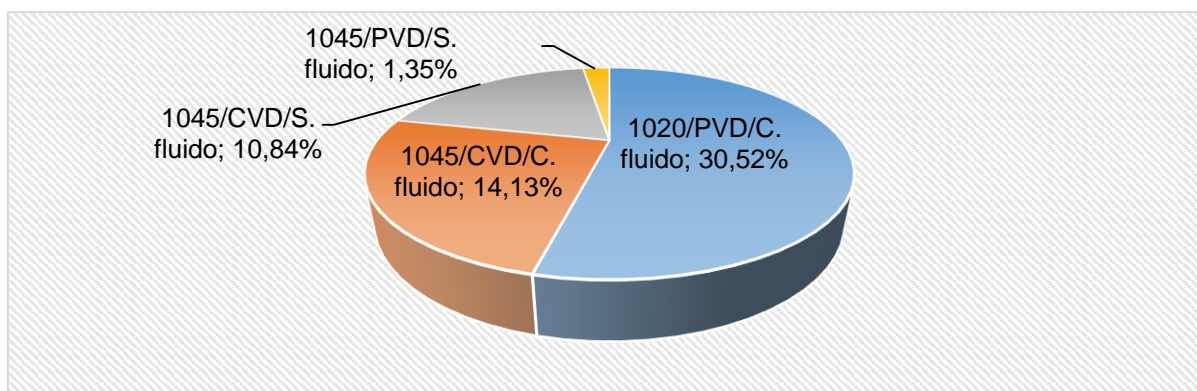
$$Relação = \frac{1020, PVD, C. fluido}{1020, CVD, C. fluido}$$

\*Variando o revestimento da ferramenta

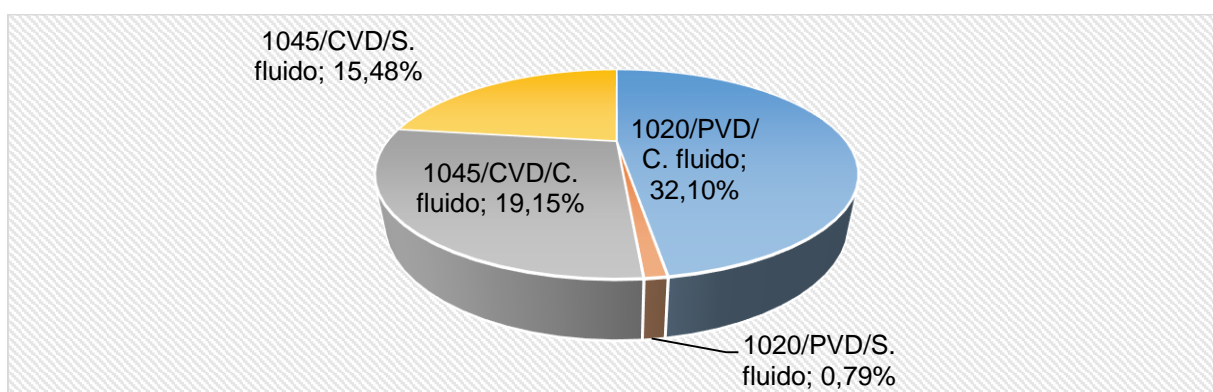


### 4.3.1 Variação de material

Neste momento serão avaliados os gráficos das relações entre variáveis de usinagem que leva em consideração o material.



**Gráfico 5 - Relação entre materiais diferentes analisando com parâmetro Ra**



**Gráfico 6 - Relação entre materiais diferentes analisando com parâmetro Rq**

Os gráficos 5 e 6 mostram duas medidas de rugosidades, na qual são comparadas as relações dadas em percentagens quando há a substituição do material na usinagem e qual o comportamento do acabamento superficial considerando a troca de um variável, respectivamente o AÇO.

Em ambos os gráficos pode-se notar que quando tem o grupo de variáveis Aço 1020, revestimento PVD e com a aplicação de fluido, foram as quem melhor apresentaram um acabamento superficial, isso reforça a certeza de que as propriedades metalúrgicas de cada material interferiu em média 31,31% no retorno de uma superfície bem acabada neste experimento, por outro lado pode-se considerar também o fato da usinagem para o aço 1020 ser efetuado com uma  $V_c=117,8$  m/min, superior à usada para o aço 1045, adotado como um parâmetro de corte na análise preliminar dos parâmetros. Portanto avaliar os dados relacionando somente troca material isoladamente neste momento torna-se invalido o experimento já que não foi adotado parâmetros de torneamento equiparados, no entanto não pode ser descartado inteiramente, pois mesmo com a variação da  $V_c$ , sabe-se que na usinagem de qualquer material, sua dureza e propriedades químicas interferem na obtenção de menores valores de rugosidades.

Continuando na avaliação dos gráficos nota-se também que conforme a escolha do parâmetro de rugosidade utilizado na medição, o mesmo gera interferência na interpretação dos dados, já que no gráfico 5 enquanto mostra a superioridades do aço 1045 na obtenção dos resultados o gráfico 6 equipara esta diferença.

#### 4.3.2 Variação entre aplicação de fluido

Nos gráficos a seguir aborda-se os percentuais de relação entre a aplicação e não aplicação de fluido no torneamento.

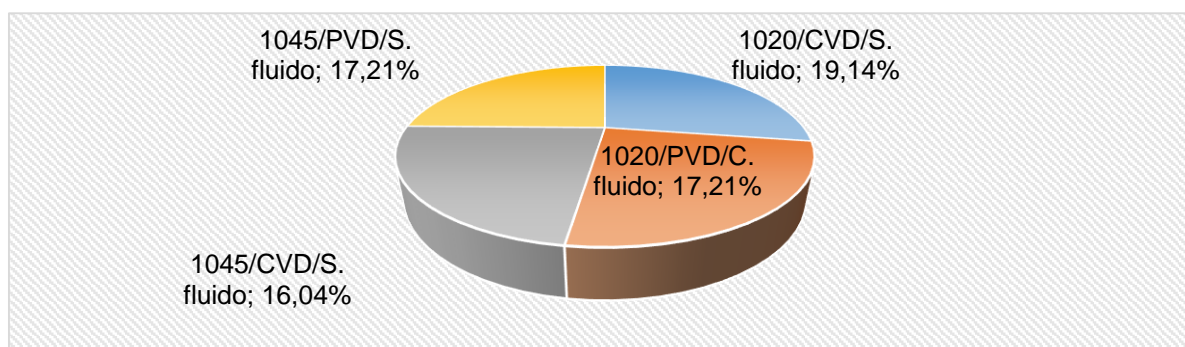
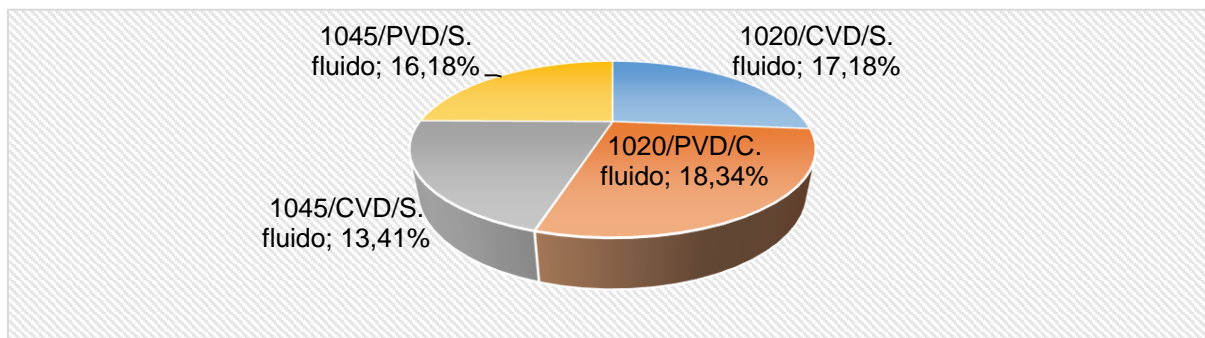


Gráfico 7 - Relação entre aplicação de fluido analisando com parâmetro Ra



**Gráfico 8 - Relação entre aplicação de fluido analisando com parâmetro Rq**

Os gráficos 7 e 8 tratam da aplicação de fluido nos grupos de variáveis de torneamento, tem-se dois grupos que foram aplicados parâmetros diferentes, os já mencionados aços, então sabe-se da aplicação de duas  $V_c$  diferentes o que gera dois resultados favoráveis aos quais as variáveis para o aço de menor teor de carbono com 20% possui o melhor resultado na configuração com revestimento CVD sem a aplicação de fluido com 19,14% de melhoria do que na configuração com a aplicação de fluido, analisando o gráfico onde tem-se dados do parâmetro  $R_a$ , e para o material com 45% de carbono o grupo com resultado satisfatório é com revestimento PVD e também sem a aplicação do fluido com 17,21% de melhoria no acabamento segundo a relação individual das médias de rugosidades avaliadas comparando a variação do fluido.

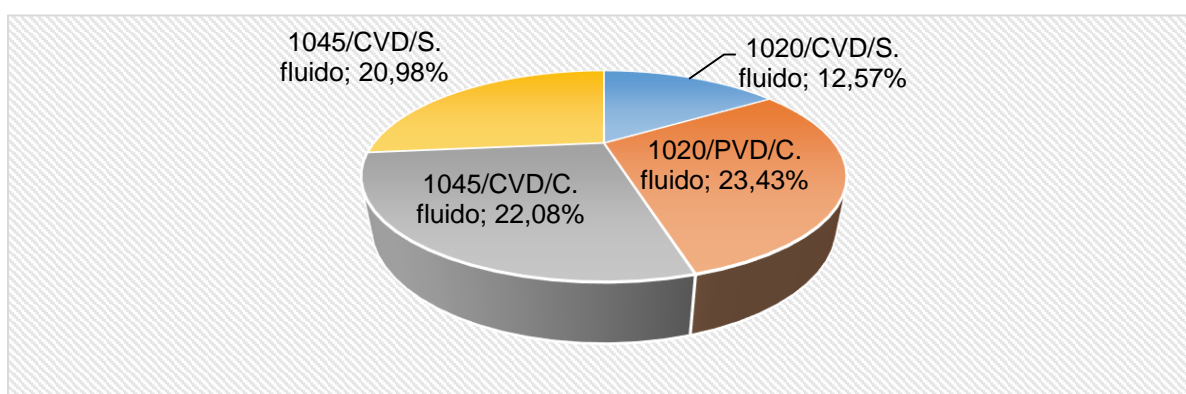
Portanto o que se resume desses gráficos 7 e 8 é o fato de tanto em  $R_a$  e  $R_q$ , os grupos de variáveis de torneamento apresentarem superioridade para as relações de aplicação ou não de fluidos se comparando com seus grupos similares, assim para esse gráfico monta-se uma tabela dos grupos melhores:

**Tabela 24 - Superioridade da relação de aplicação de fluido**

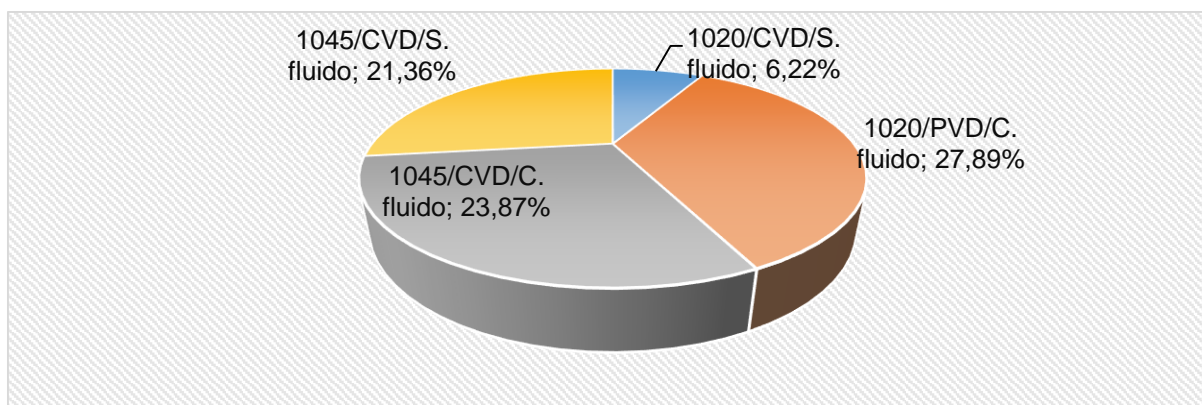
PARÂMETRO	GRUPO DE VARIÁVEL SUPERIOR	%	GRUPO DE VARIÁVEL INFERIOR
Ra	1045/PVD/S. fluido	<b>17,21</b>	1045/PVD/C. fluido
	1045/CVD/S. fluido	<b>16,04</b>	1045/CVD/C. fluido
	1020/CVD/S. fluido	<b>19,14</b>	1020/CVD/C. fluido
	1020/PVD/C. fluido	<b>17,21</b>	1020/PVD/S. fluido
Rq	1045/PVD/S. fluido	<b>16,18</b>	1045/PVD/C. fluido
	1045/CVD/S. fluido	<b>13,41</b>	1045/CVD/C. fluido
	1020/CVD/S. fluido	<b>17,18</b>	1020/CVD/C. fluido
	1020/PVD/C. fluido	<b>18,34</b>	1020/PVD/S. fluido

#### 4.3.3 Variação do revestimento da ferramenta

Para os seguintes gráficos serão avaliados os tipos de revestimentos das ferramentas.



**Gráfico 9 - Relação entre troca de ferramentas analisando com parâmetro Ra**



**Gráfico 10 - Relação entre troca de ferramentas analisando com parâmetro Rq**

Nos gráficos 9 e 10, o alvo de comparação proposto é nas relações dos resultados de rugosidades que cada revestimento apresentou e da mesma forma não deve-se basear somente nesta variável para determinar quais grupos devem ser selecionadas para obtenção de melhores retornos de acabamento.

As informações que destacam-se nos gráficos é o percentual de melhora no acabamento dos materiais e na divergência quando visto que o revestimento utilizado não é o mesmo. Conforme os gráficos o aço 1020 oferece melhor acabamento com o PVD e o aço 1045 com o CVD, respectivamente com  $\pm 23\%$  e  $22\%$  no parâmetro Ra e  $\pm 27\%$  e  $23\%$  em Rq.

#### 4.3.4 Avaliando os resultados entre grupos com três variáveis

Compreendendo-se que a avaliação dos gráficos nos subtítulos anteriores não permitem serem confrontados com ambos os materiais, sobretudo pela diferença no resultado que exercem velocidades diferentes de corte, então define-se dois grupos de variáveis que foram definitivas para valores de rugosidade médias baixas e assim propõe-se um gráfico no qual estas variáveis são perfeitamente analisadas sem perda de certeza experimental. Para isso procura-se coincidência em repetições de performance dos grupos nos gráficos, onde destacam-se com o material SAE 1020/PVD/C. Fluido e para o SAE 1045/CVD/S. Fluido, isto pode ser visto melhor nas tabelas 19 e 20 e também nos gráficos tipo radar, na qual os dados apresentam melhoras favoráveis nas três variáveis simultaneamente do torneamento em estudo.

Os gráficos 11 ao 16, apresentam melhor as proporções que obtiveram os resultados das relações entre as variáveis do processo, ao qual se destacam os grupos mencionados acima.

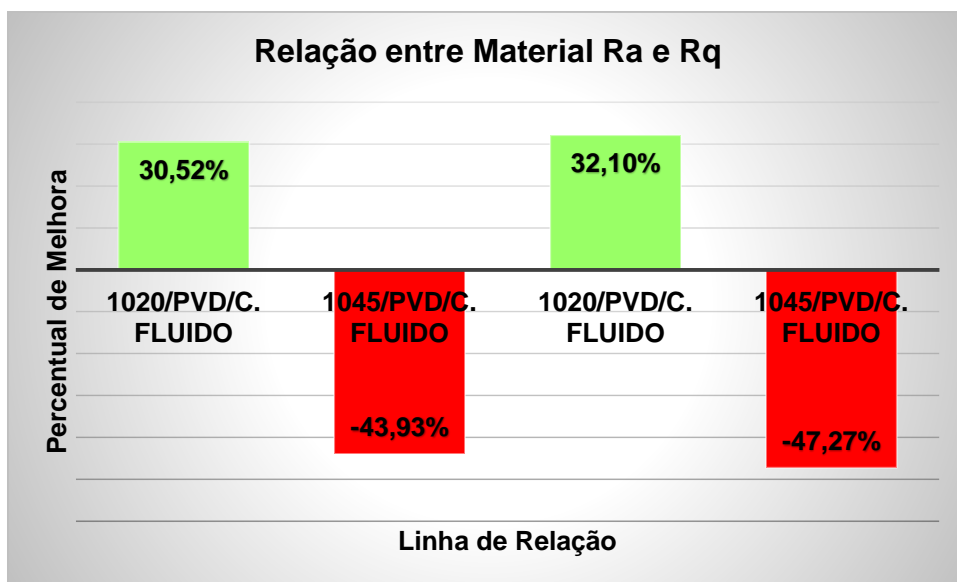


Gráfico 11 - Relação entre materiais

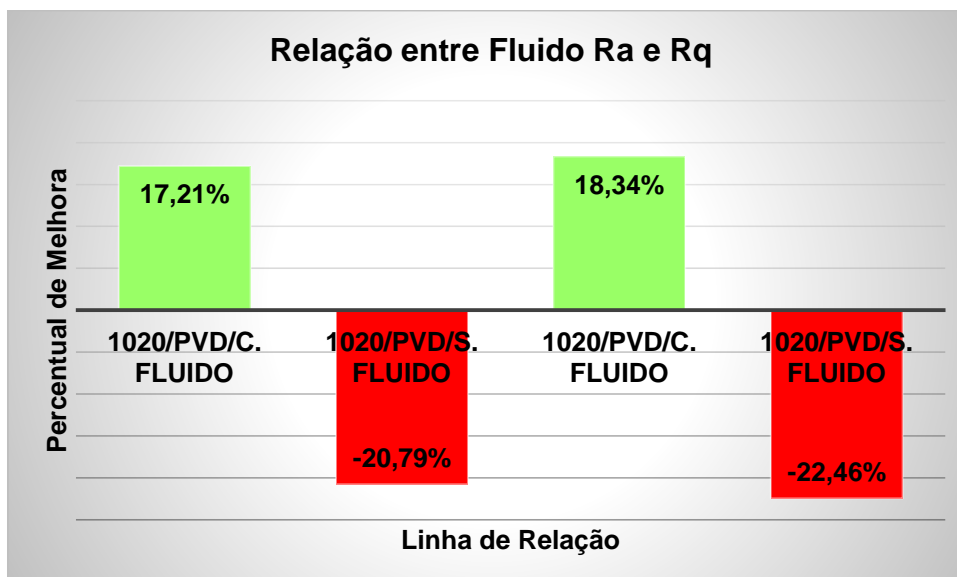


Gráfico 12 - Relação entre fluido

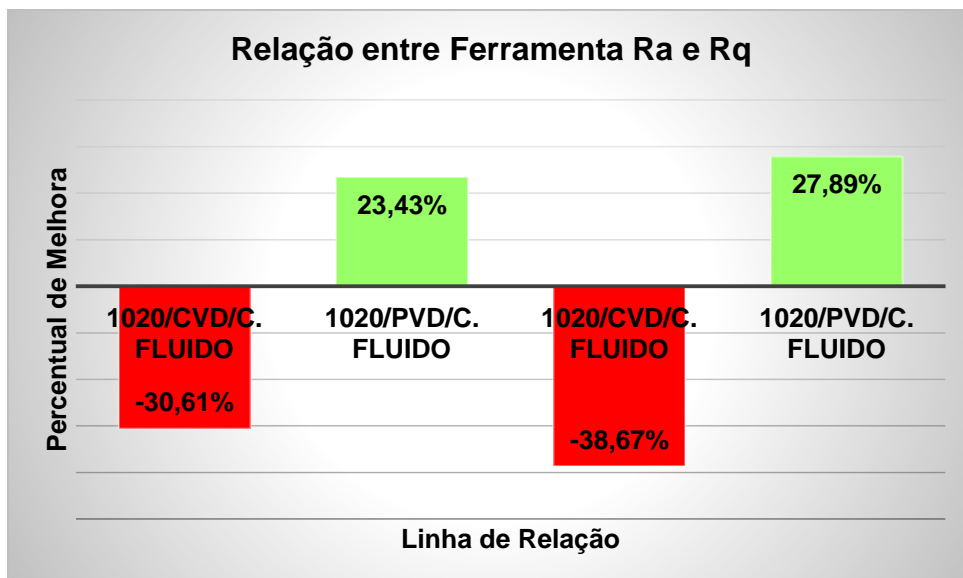


Gráfico 13 - Relação entre ferramenta

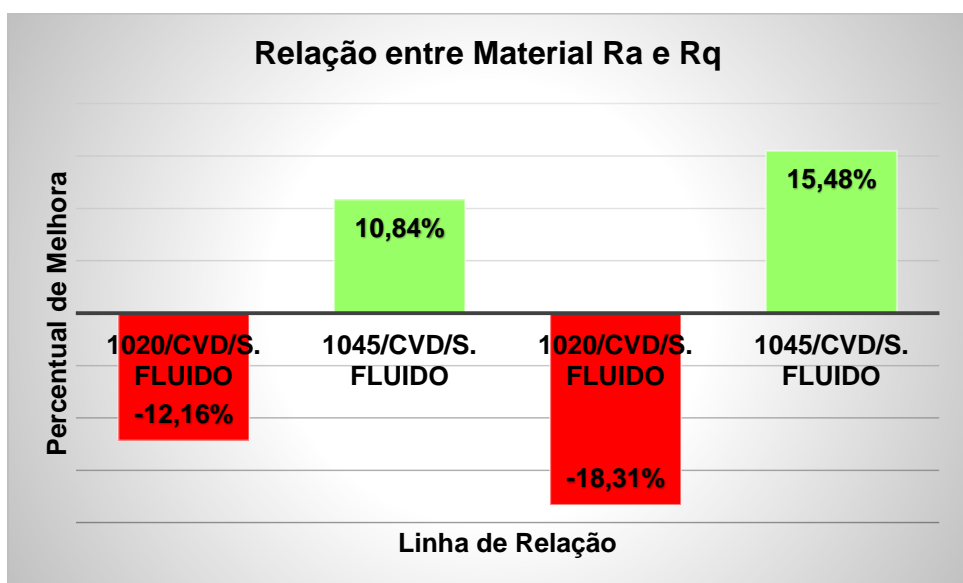


Gráfico 14 - Relação entre materiais

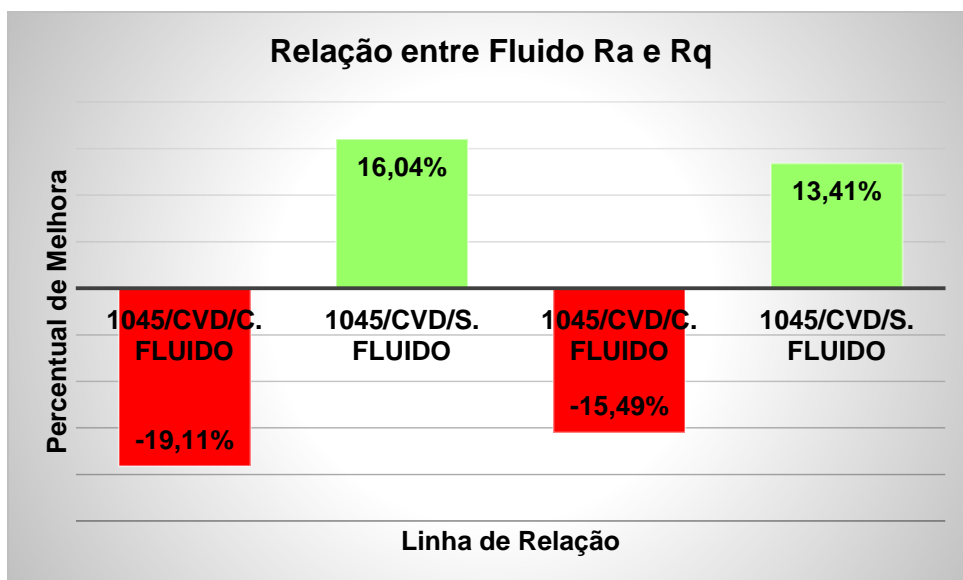


Gráfico 15 - Relação entre fluido

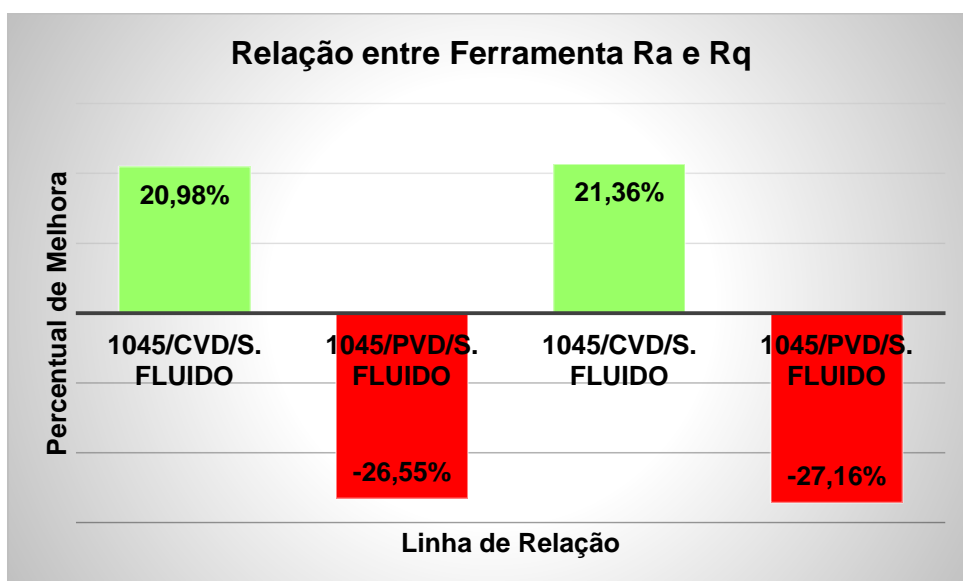
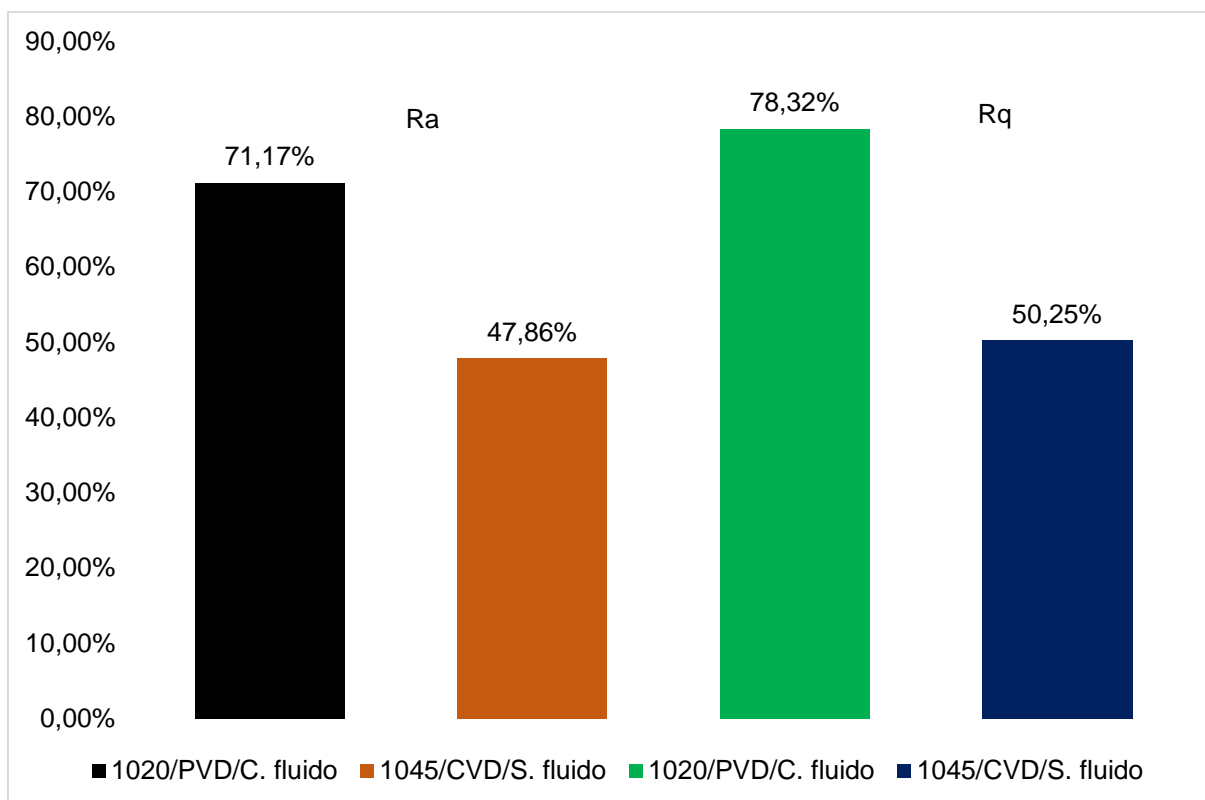


Gráfico 16 - Relação entre ferramenta

A seguir, é apresentado a somatória da relação entre as variáveis que apresentou os melhores acabamentos segundo as rugosidades apresentadas no decorrer da variação do material, ferramenta e o fluido.





**Gráfico 17 - Soma das relações com os melhores grupos de variáveis comparando por parâmetros de rugosidade.**

No gráfico 17 percebe-se que há concordância para os resultados que indicam na usinagem com os mesmos grupos de variáveis vistos tanto pelos parâmetros Ra quanto Rq, ou seja, a configuração dessas variáveis não sofre alteração analisando por qual seja o parâmetro de rugosidade, conservando a veracidade nos resultados de torneamento e finalmente comprovando o fato dos respectivos grupos serem os melhores possíveis tendo como seleção o material, ferramenta e aplicação ou não de fluido aos quais propôs-se ensaiar em laboratório.

## 5 CONCLUSÃO

Concernente às análises feitas nas superfícies dos corpos de provas torneados e confrontando os dados propostos pelos softwares “R” e Excel para ANOVA, conclui-se que:

✓ O fato de se aplicar velocidades de corte diferente para os aços gerou grande variação das médias de rugosidade, portanto, acredita-se que o fator de maior interferência possa ter sido transmitida por este parâmetro de torneamento (velocidade de corte), e não ocasionado diretamente pela variável de torneamento (tipo do aço), confrontando velocidade de corte x material.

✓ Focando-se nos resultados das variáveis de terceira ordem, os melhores acabamentos obtidos com os parâmetros Ra e Rq são coerentes entre si, admitido, conforme os gráficos 1 e 3, e, 2 e 4 (gráficos tipo radar que avalia as variáveis de usinagem e suas médias para cada parâmetro do rugosímetro), o torneamento do aço SAE 1020 apontando para melhor acabamento superficial quando utilizado variáveis do processo com ferramenta PVD e aplicando-se o fluido de corte, já para o aço SAE 1045 muda-se o revestimento da ferramenta para CVD e também deixa-se de aplicar fluido aos quais propicia melhor acabamento.

✓ Uma possível hipótese para o fenômeno observado na tabela 10, no qual há uma comparação na variável fluido, o fato dos resultados de rugosidade serem maiores quando não se aplica o refrigerante pode estar diretamente relacionada ao indício do mesmo estar fora dos padrões de propriedades ou mesmo vencido, isto leva a uma ineficiência para obter-se benefícios com fluido na usinagem.

✓ Nos gráficos de relações que compara os grupos de variáveis com melhor resultado, nota-se um ganho no acabamento superficial de 30% e 32% do aço 1020 (com velocidade de corte  $V_c = 117,8$  m/min), sobre o aço 1045 (com velocidade de corte  $V_c = 94,25$  m/min), ainda com o aço 1020, variando aplicação ou não de fluido os valores de ganho no acabamento apontam 17% e 18% resultado de rugosidade menor quando aplica-se fluido, e enfim, variando a ferramenta percebe-se melhora quando utilizado revestimento PVD, sendo 23% e 27% melhor que CVD. Analisando o aço 1045 as relações mudam comparando o material e coloca o respectivo aço mais satisfatório avaliando o acabamento de 10% e 15% melhor que o aço 1020, ainda comparando variações com o aço carbono 1045, segundo o fluido a não aplicação do

mesmo aparece 16% e 13% menos rugosa e comparando o uso da ferramenta o tipo com melhor resultado para o aço 1045 é CVD com 20% e 21% sobre o uso de PVD.

✓ Conclui-se que dada as velocidades de corte adotadas como parâmetro da usinagem que varia de acordo com o material mantendo o avanço e a profundidade de corte iguais para ambos, os grupos de variáveis de torneamento, tratadas individualmente neste trabalho, com acabamento superficial melhor são dadas em função da velocidade de corte, no entanto ignorando-se a diferença de velocidade de corte conclui-se que o grupo onde se gera acabamento menos rugoso é utilizando Aço SAE 1045, sem a aplicação de fluido e torneada com ferramenta de revestimento em CVD.

✓ Com relação às ferramentas intercambiáveis com os revestimentos em PVD e CVD, praticamente não apresentaram desgastes de aresta, provavelmente pela relação de parâmetros utilizadas no processo, proporcionaram baixos esforços de usinagem, portanto ambas conseguiram obter sua performance de corte de acordo com cada revestimento peculiar apresentando assim ausência de desgastes seja lá qual for sua natureza conforme Anexos G, H, I e J.

## REFERÊNCIA

ANJOS, Jorge Marques de. **Aula 11: Torneamento – Introdução**. 2012 Disponível em: <<http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15049/material/2012-2%20Aula%2011%20-%20Torneamento%20-%20introdu%C3%A7%C3%A3o.pptx>>. Acesso em: 16 de Abril de 2015.

**Aço construção mecânica**. Disponível em: < <http://www.ggdmetals.com.br/aco-construcao-mecanica>>. Acesso em: Abril de 2015.

ARAUJO, Pablício Lino Camargo de; VERARDO, Frenthélio Victuriano. **Análise Comparativa da Usinabilidade dos Aços SAE 1045 e SAE 8620**. Trabalho de Conclusão de Curso, 2015.

BUENO, Francisco da Silveira. **Minidicionário da Língua Portuguesa**. Editora FTD – São Paulo. 2000.

**CMS – Catalogo Eletrônico Iscar**. Disponível em: <<http://www.iscar.com/eCatalog/Index.aspx>>. Acesso em: Maio de 2015.

COSTA, Hamilton Nunes da. **Resumo**. Disponível em: <<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/tolerancias.asp>>. Acesso em: 8 Abril de 2015.

**Definição – O que é usinagem**. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/451-usinagem>>. Acesso em: 8 Abril de 2015.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 3.ed. São Paulo: Artliber, 2001. 244p.

FERRARESI, Dino. **Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher : USP, 1970- nv.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1924.

FRANCISCO, Wilson A. **Estudo do Comportamento do Óleo Vegetal na Usinagem do Aço 52100**. 2006. 117 f. Trabalho de Conclusão de Curso, 2006.

HENRIQUES, Carla. **Análise de Variância**. 2010. Disponível em: < <http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/psarabando/ANOVA%20resumida.pdf>>. Acessado em: 12 Maio de 2015.

MACHADO, Alisson Rocha. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: E. Blucher, 2011. 397 p.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros: Planejamento e Análise de Experimentos com um Único Fator: A análise de Variância**. Rio de Janeiro: LTC, 2013

SOUZA, André João de. **Processos de Fabricação por Usinagem: Parte 1**. 2011. Disponível em: <[https://chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem\\_Parte1.pdf](https://chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem_Parte1.pdf)>. Acesso em: 15 de Abril de 2015.

**Tornos**, Disponível em:< <http://www.nardinisa.com.br/produtos/tornos/>>. Acesso em: Abril de 2015.

## **ANEXOS**

ANEXO A – Divisão da barra para análise preliminar e usinagem final

ANEXO B – Projeto do corpo de prova para aço SAE 1020 e SAE 1045 para análise preliminar

ANEXO C – Esquema de posições para coleta das rugosidades no corpo de prova na análise preliminar

ANEXO D – Sequência de aleatoriedade para usinagem conforme exigência da ANOVA

ANEXO E – Projeto do corpo de prova para aço SAE 1020 e aço SAE 1045

ANEXO F – Quadro de cruzamentos de variáveis para usinagem conforme critérios da ANOVA

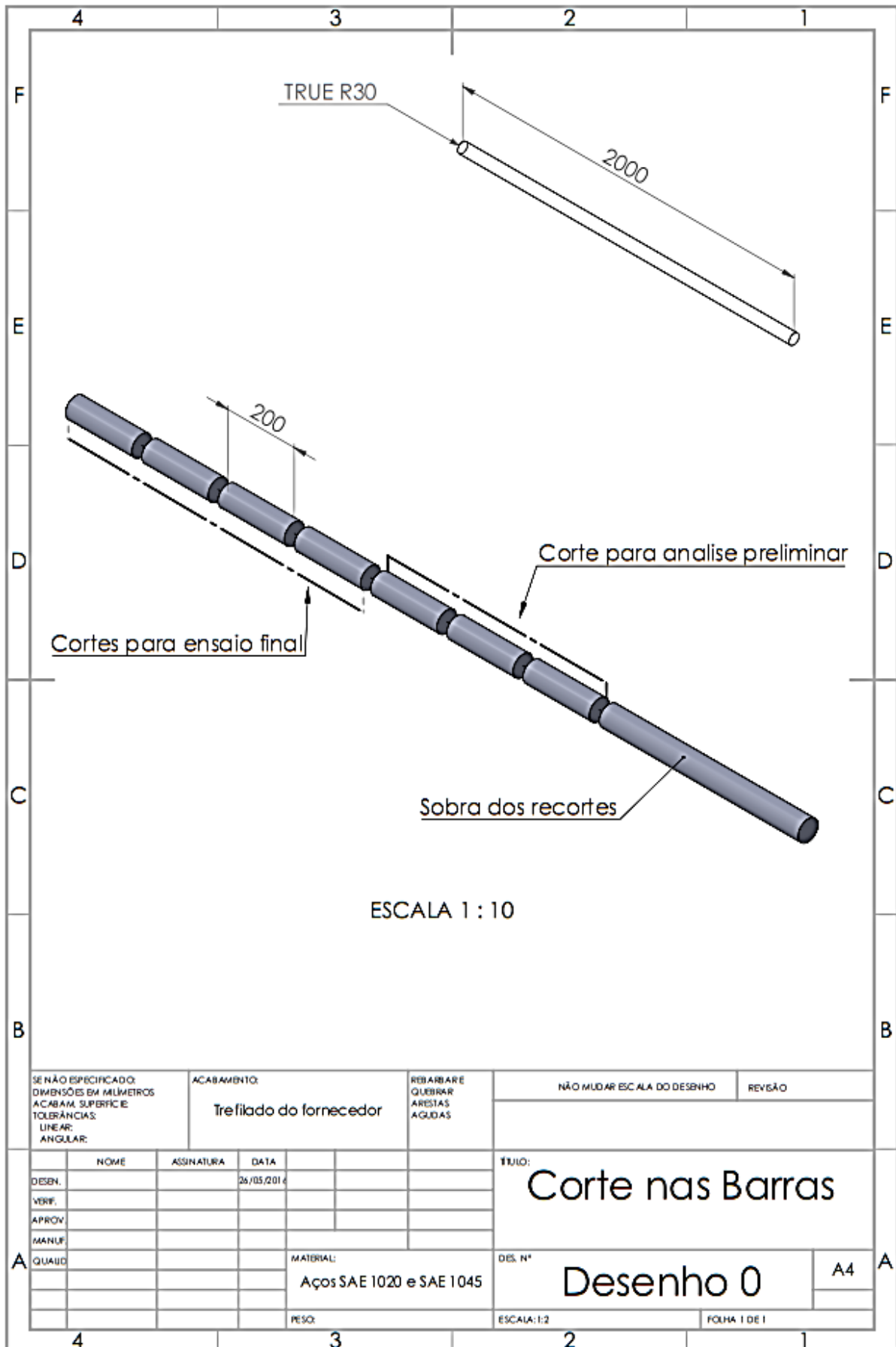
ANEXO G – Fotografia da aresta de corte da ferramenta intercambiável com revestimento em PVD, pós usinagem

ANEXO H – Fotografia da aresta de corte da ferramenta intercambiável com revestimento em CVD, pós usinagem

ANEXO I – Fotografia da aresta de corte da ferramenta intercambiável com revestimento em PVD, antes da usinagem

ANEXO J – Fotografia da aresta de corte da ferramenta intercambiável com revestimento em CVD, antes da usinagem

ANEXO A – Divisão da barra para análise preliminar e usinagem final

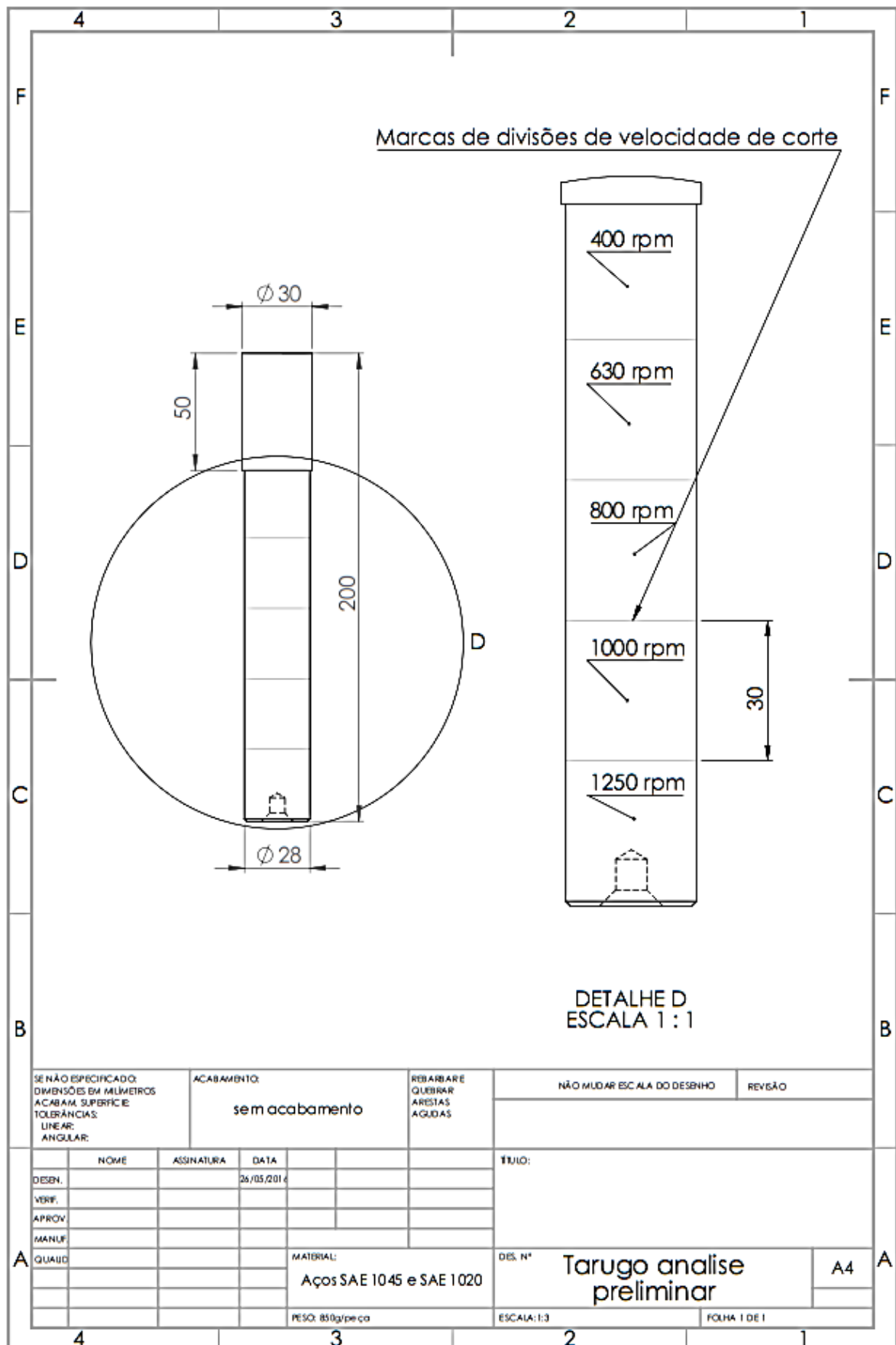


SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:  Trefilado do fornecedor		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO: <b>Corte nas Barras</b>			
VERIF.			26/05/2014						
APROV.									
MANUF.									
QUAID.				MATERIAL: Aços SAE 1020 e SAE 1045		DES. Nº		<b>Desenho 0</b>	
				PESO:		ESCALA: 1:2		FOLHA 1 DE 1	

A

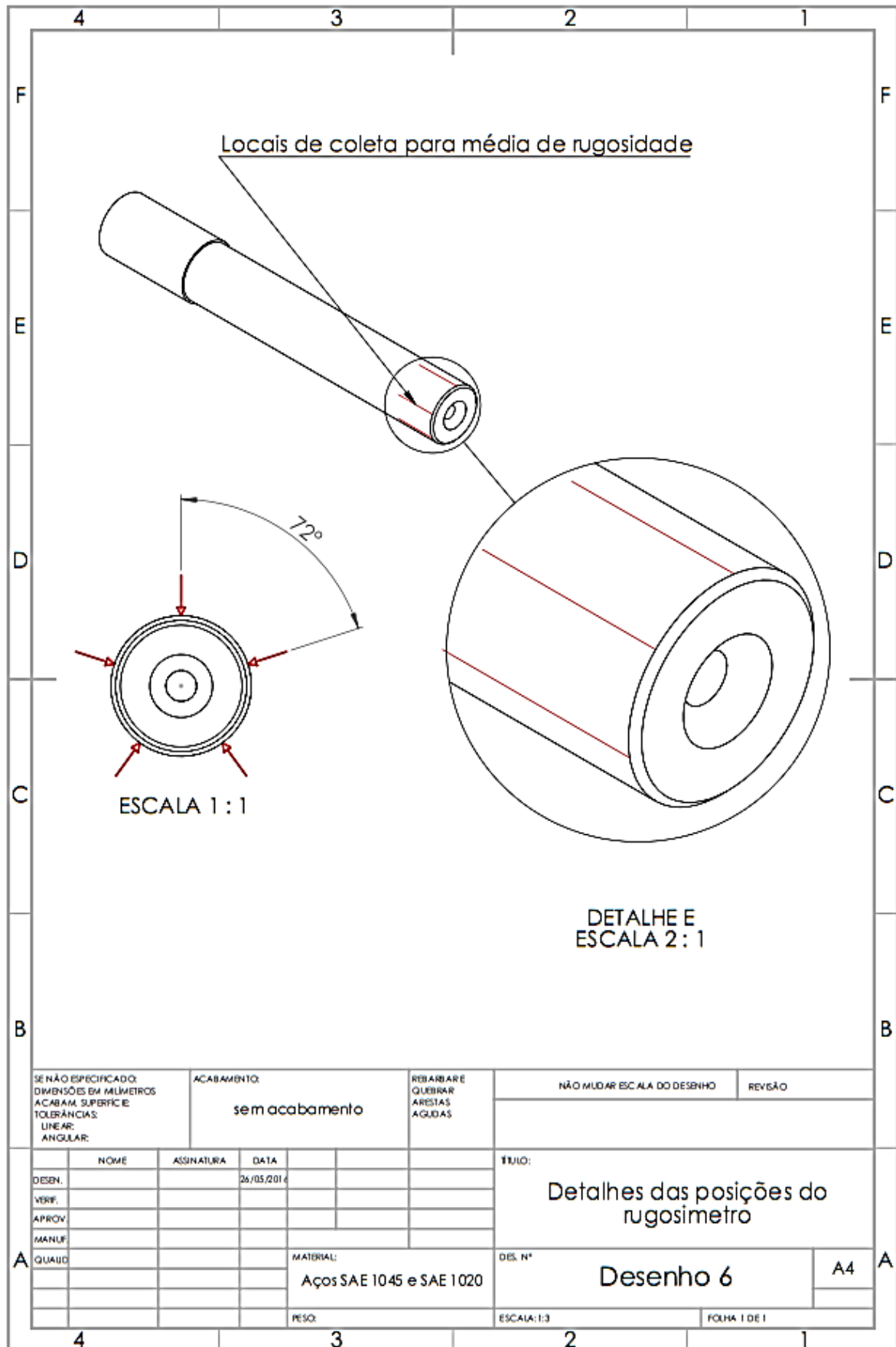
A

ANEXO B – Projeto do corpo de prova para aço SAE 1020 e SAE 1045 para análise preliminar





ANEXO C – Esquema de posições para coleta das rugosidades no corpo de prova na análise preliminar



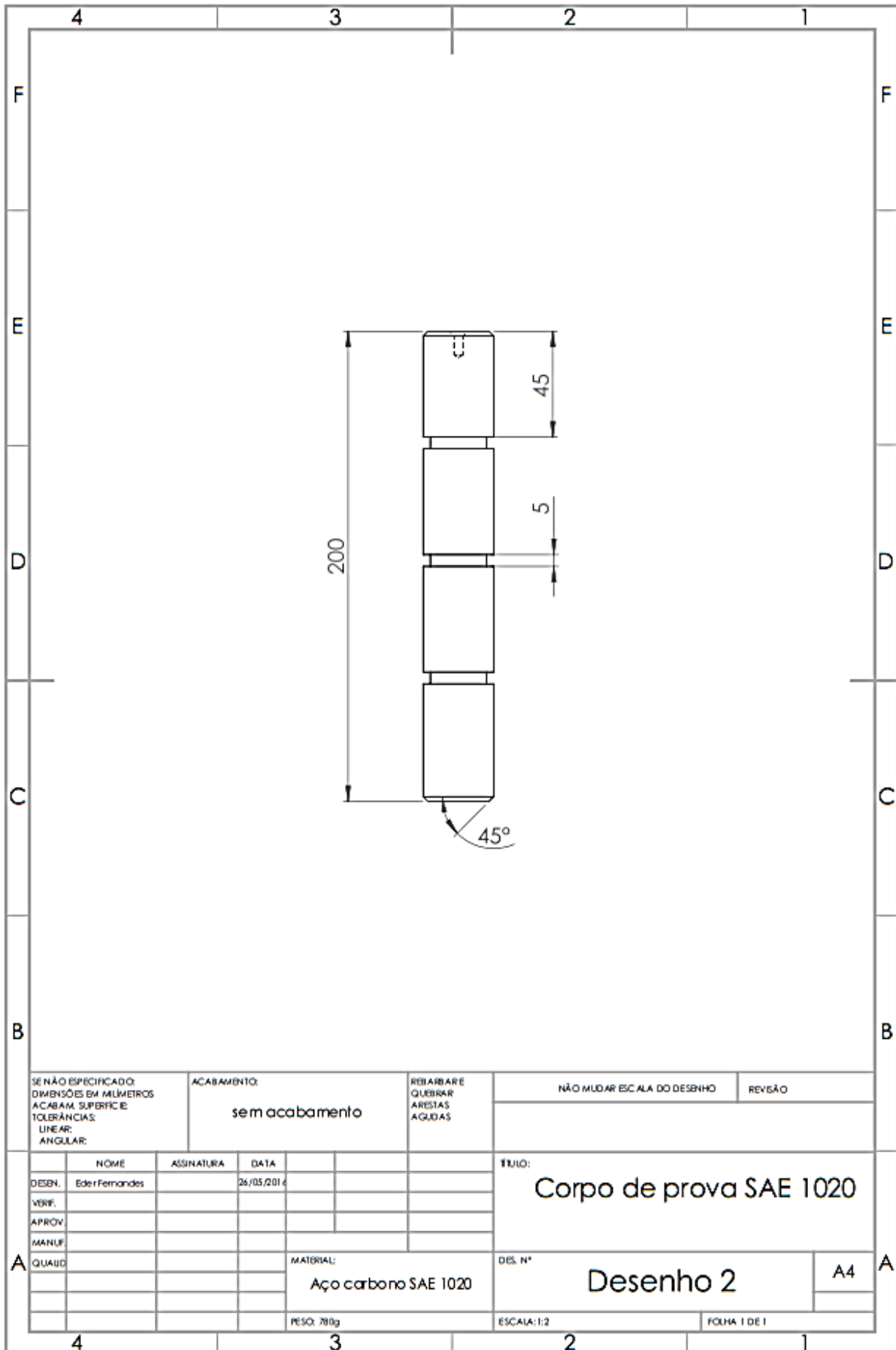
ANEXO D – Sequência de aleatoriedade para usinagem conforme exigência da ANOVA

Sequência de aplicação de variáveis conforme ANOVA

Referência	Materiais	Fluido	Ferramenta	Aleatorização
A	SAE 1020	c/Fluido	CVD	1
B	SAE 1020	s/Fluido	PVD	2
C	SAE 1020	c/Fluido	PVD	3
D	SAE 1020	s/Fluido	CVD	5
A	SAE 1045	c/Fluido	PVD	6
B	SAE 1045	c/Fluido	CVD	7
C	SAE 1045	s/Fluido	CVD	4
D	SAE 1045	s/Fluido	PVD	8

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAMENTO SUPERFÍCIE		ACABAMENTO:  Passo de 1 mm		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:									
NOME		ASSINATURA		DATA		Sequência			
DESEN.		VERIF.		APROV.					
MANUF.		QUAID		MATERIAL:					
A		Aços SAE 1020 e SAE 1045		DES. N°					
				PESO:		Desenho 5		A4	
				ESCALA: 1:3		FOLHA 1 DE 1			

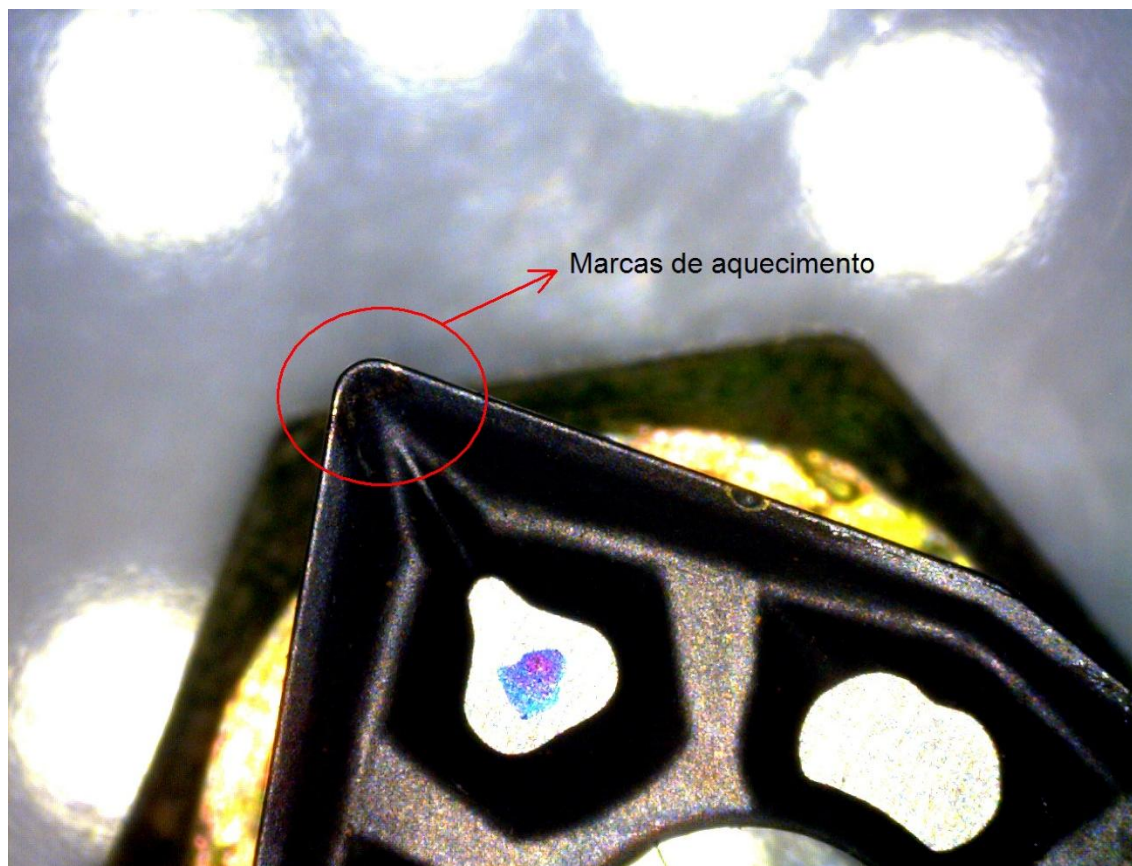
ANEXO E – Projeto do corpo de prova para aço SAE 1020 e aço SAE 1045



ANEXO F – Quadro de cruzamentos de variáveis para usinagem conforme critérios da ANOVA

Ferramenta Revestimento	Fluido	Material SAE	Réplica	Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	Aleatorização Ordem
<b>Processo PVD TiAlN+TiN</b>	Com	1020	1	Ra:1,36; Rz:7,2; Rq:1,65	1
			2	Ra:1,47; Rz:7,12; Rq:1,74	
			3	Ra:1,45; Rz:7,11; Rq:1,73	
<b>Processo PVD TiAlN+TiN</b>	Com	1045	1	Ra:1,97; Rz:10,18; Rq:2,39	6
			2	Ra:2,15; Rz:10,51; Rq:2,58	
			3	Ra:2,04; Rz:10,47; Rq:2,57	
<b>Processo PVD TiAlN+TiN</b>	Sem	1020	1	Ra:2,03; Rz:10,82; Rq:2,61	5
			2	Ra:1,52; Rz:8,5; Rq:1,92	
			3	Ra:1,62; Rz:7,55; Rq:1,74	
<b>Processo PVD TiAlN+TiN</b>	Sem	1045	1	Ra:1,67; Rz:9,0; Rq:2,07	7
			2	Ra:1,73; Rz:9,02; Rq:2,15	
			3	Ra:1,7; Rz:9,01; Rq:2,1	
<b>Processo CVD TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN</b>	Com	1020	1	Ra:1,96; Rz:12,42; Rq:2,47	3
			2	Ra:1,8; Rz:10,84; Rq:2,23	
			3	Ra:1,83; Rz:10,8; Rq:2,4	
<b>Processo CVD TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN</b>	Com	1045	1	Ra:1,55; Rz:7,81; Rq:1,88	4
			2	Ra:1,63; Rz:7,91; Rq:1,96	
			3	Ra:1,62; Rz:7,89; Rq:1,9	
<b>Processo CVD TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN</b>	Sem	1020	1	Ra:1,07; Rz:7,36; Rq:1,95	2
			2	Ra:1,72; Rz:7,9; Rq:2,01	
			3	Ra:1,73; Rz:7,57; Rq:1,92	
<b>Processo CVD TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN</b>	Sem	1045	1	Ra:1,27; Rz:7,13; Rq:1,55	8
			2	Ra:1,39; Rz:8,26; Rq:1,74	
			3	Ra:1,37; Rz:8,0; Rq:1,68	

ANEXO G – Fotografia da aresta de corte da ferramenta intercambiável com revestimento em PVD, pós usinagem

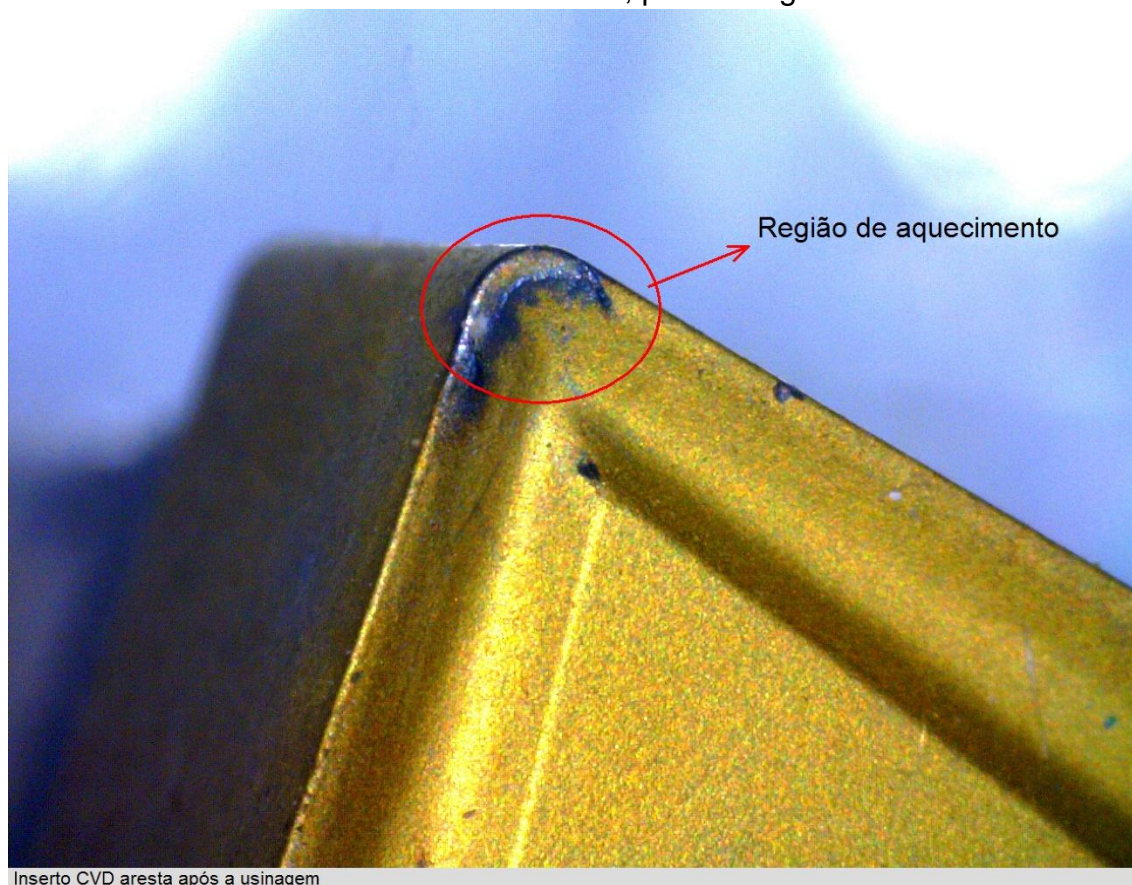


Inserto PVD aresta após a usinagem

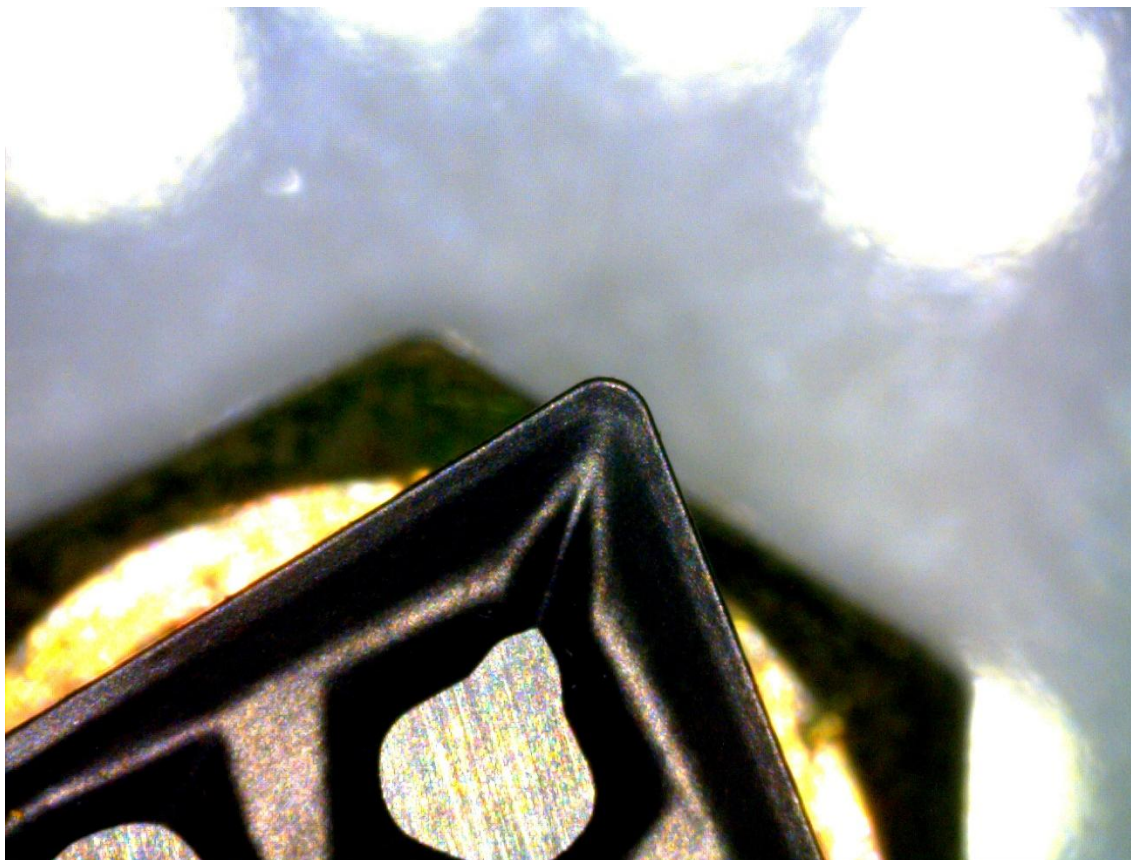


Inserto PVD aresta após a usinagem

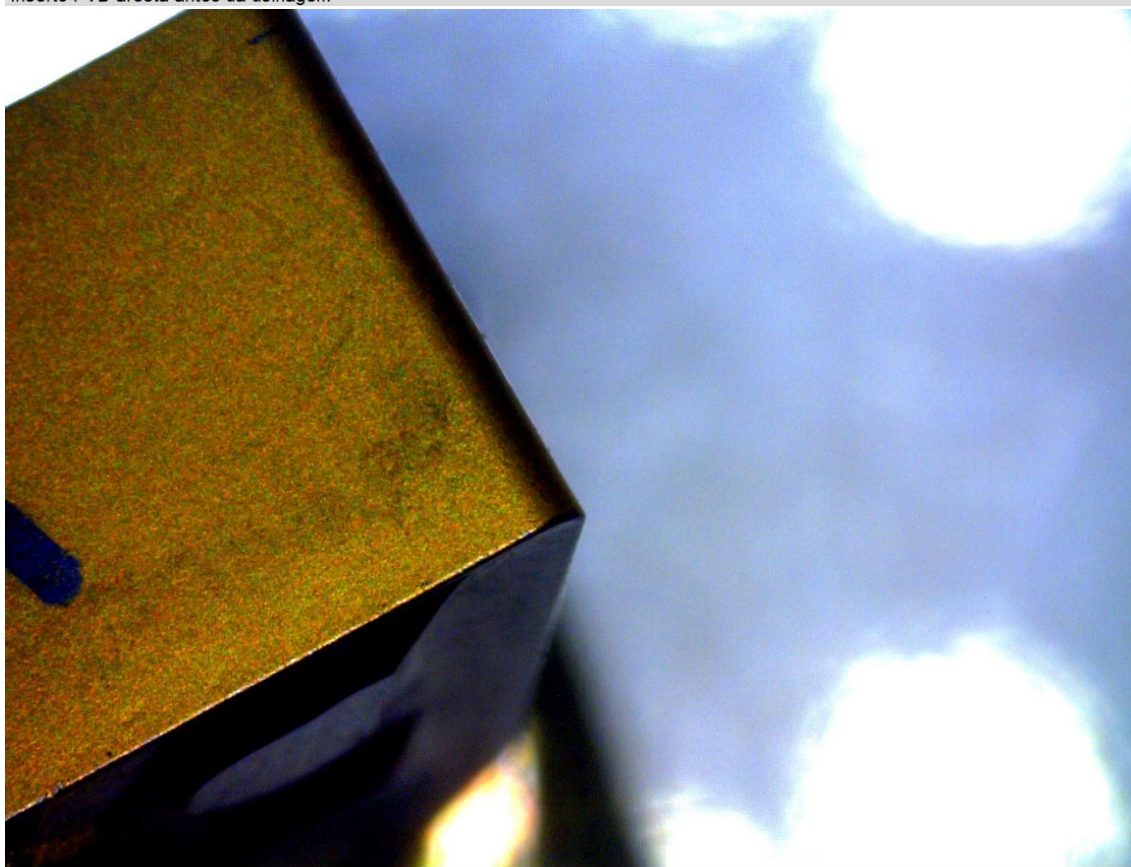
ANEXO H – Fotografia da aresta de corte da ferramenta intercambiável com revestimento em CVD, pós usinagem



ANEXO I – Fotografia da aresta de corte da ferramenta intercambiável com revestimento em PVD, antes da usinagem

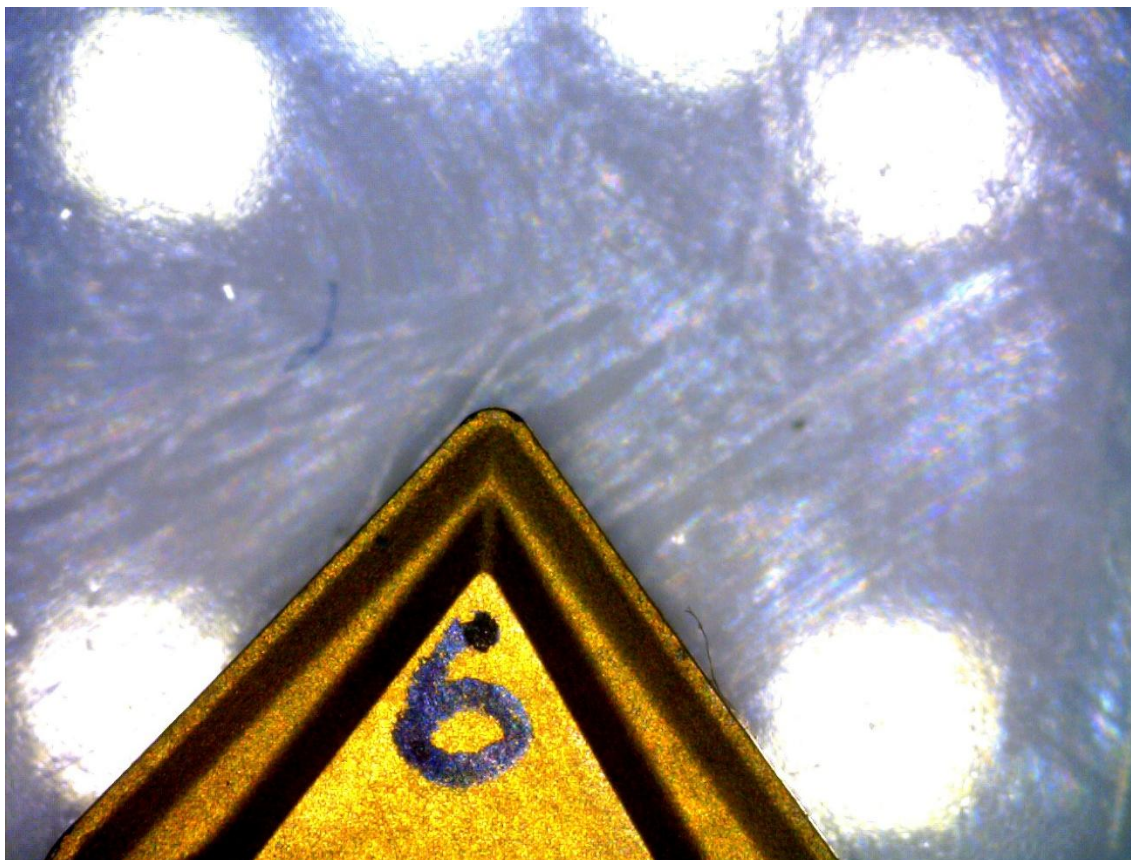


Inserto PVD aresta antes da usinagem

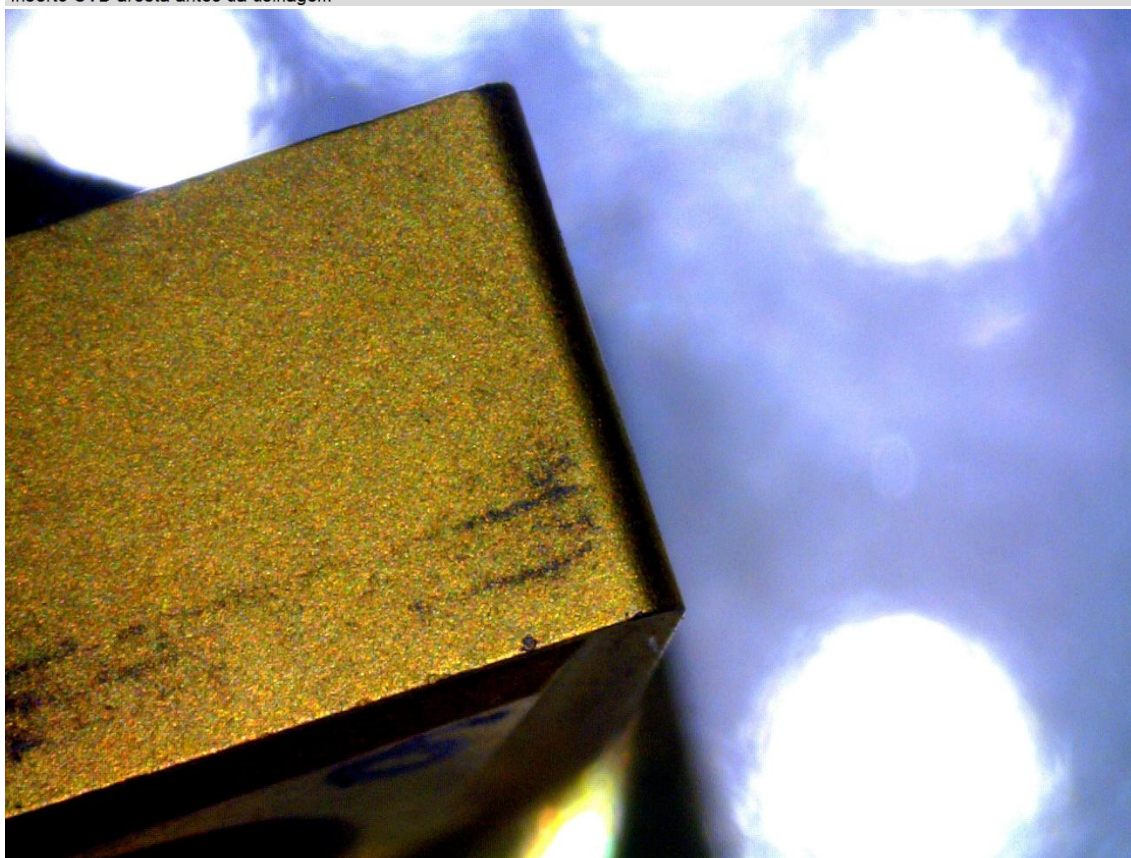


Inserto PVD aresta antes da usinagem

ANEXO J – Fotografia da aresta de corte da ferramenta intercambiável com revestimento em CVD, antes da usinagem



Inserto CVD aresta antes da usinagem



Inserto CVD aresta antes da usinagem