

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE EM TORNEAMENTO DE AÇO ABNT 1045, PARA
DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE E FERRAMENTAS.**

Diego Carreras Bezerra

Orientador: Profa. Dra. Izabel Fernanda Machado

São Paulo
2008

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE EM TORNEAMENTO DE AÇO ABNT 1045, PARA
DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE E FERRAMENTAS.**

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção do título de
Graduação em Engenharia

Diego Carreras Bezerra
Orientador: Profa. Dra. Izabel Fernanda Machado

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Bezerra, Diego Carreras

**Avaliação da usinabilidade em torneamento de aço ABNT 1045, para diferentes velocidades de corte e ferramentas / D.C. Bezerra. – São Paulo, 2008.
p.98**

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Projeto mecânico I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

À professora Izabel, por todo o apoio, a orientação e o empenho incessantes e em todos os momentos, além de sua valiosa amizade que sempre permitiu um ambiente harmonioso e agradável de trabalho.

A toda a equipe do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), pela atenção, oferecimento dos recursos necessários e a ajuda indispensável.

Ao Marcelo Acácio Rodrigues pelas sugestões e indicações para o aperfeiçoamento constante deste trabalho.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste intento.

RESUMO

Usinagem é um termo que cobre vários processos de manufatura que envolvem remoção de material. Esta remoção de material visa: obtenção das formas finais, acabamento superficial adequado e se alcançar os valores de tolerância requeridos. Quase todos os produtos manufaturados têm componentes que foram usinados. Dentre os processos de usinagem, usualmente praticados na indústria, estão o torneamento, fresamento e furação. O processo de torneamento, o qual está relacionado diretamente com este trabalho, consiste na utilização de ferramentas com corte em um único ponto, o qual é fixo. A ferramenta remove material de uma peça que gira em torno de um eixo fixo. Dos parâmetros que regem o processo de torneamento, destacam-se: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivos realizar ensaios para avaliar a usinabilidade utilizando diferentes velocidades de corte no torneamento do aço ABNT 1045. São utilizadas três velocidades de corte (V_c), sendo mantida a relação avanço (f) pela profundidade de corte (a_p) menor ou igual 0,2 ($f/a_p < 0,2$). A usinabilidade é avaliada comparando as forças de corte e de avanço nas diferentes velocidades e também o acabamento superficial (rugosidade). Para as mesmas condições de ensaio são utilizadas pastilhas planas e triangulares de metal duro com e sem recobrimento para um estudo comparativo do desgaste das mesmas. Na análise dos resultados são correlacionados: forças de corte e avanço, bem como acabamento superficial com as diferentes velocidades de corte utilizadas. Todas as inferências são feitas a partir do tratamento estatístico e são realizadas comparações entre os parâmetros de usinagem a fim de verificar qual a influência das condições, como a ferramenta de corte, na usinagem do aço ABNT 1045.

Palavras-chave: aço ABNT 1045, usinabilidade, torneamento, velocidade de corte, ferramentas, desgaste.

ABSTRACT

Machining is a manufacturing process in which the material (chip) is removed from the surface of the workpiece to obtain geometry, finishing and tolerances required for the component. Almost all manufactured products had their components machined. Therefore, machining corresponds to an important manufacturing processes and one of the most important machining process is turning. In turning operation the workpiece is rotated and a cutting tool removes material, producing chips. The cutting parameters are very important to determine the surface quality and the tolerance. The most important cutting parameters are cutting speed, feed and cutting depth. The main objective of this work is to evaluate the machinability of the ABNT 1045 steel in different cutting speeds during the turning. Three cutting speeds (V_c) were selected and the relation between feed (f) and the cutting depth (a_p) was lower or equal to 0.2 ($f/a_p < 0.2$). The machinability was compared in the different conditions by analyzing the cutting and feed forces and also the roughness. The tools used in the tests were cemented carbide tools (triangular and plain geometry) with and without coating. The wear resistance during the turning process is compared in the different conditions. A statistical analysis was also carried out to evaluate securely the results.

Keywords: ABNT 1045 steel, machinability, turning, cutting speed, tools, wear.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Torneamento	01
1.2. Desgaste e Vida da Ferramenta.....	05
1.3. Usinabilidade.....	06
1.4. Usinabilidade de Aços Carbono.....	07
2. OBJETIVOS	09
3. MATERIAIS E MÉTODOS	10
3.1. Material	10
3.2. Métodos.....	10
3.2.1. Caracterização do Aço ABNT 1045	10
3.2.1.1. Determinação da Dureza Vickers (HV 30)	11
3.2.1.2. Determinação da Microdureza (HV).....	11
3.2.1.3. Metalografia	11
3.2.1.4. Microscopia Óptica e Eletrônica de Varredura.....	12
3.2.1.5. Determinação da Fração Volumétrica de Perlita	12
3.2.1.6. Determinação do Tamanho de Grão	12
3.2.2. Preparação de Corpos-de-Prova para Ensaios de Usinagem	13
3.2.3. Ensaios de Usinagem	14

3.2.4. Avaliação da Força de Usinagem – Torneamento	15
3.2.5. Tipos de Ferramentas	17
3.2.6. Análise Estatística	18
4. RESULTADOS.....	19
4.1. Caracterização Microestrutural	19
4.2. Fração Volumétrica de Perlita.....	20
4.3. Tamanho de Grão	22
4.4. Dureza (HV).....	23
4.5. Microdureza (HV).....	24
4.5.1. Inclusões de Sulfeto de Manganês (MnS).....	25
4.5.2. Ferrita	26
4.5.3. Perlita	28
4.6. Ensaio de Usinagem	29
4.7. Rugosidade.....	34
4.8. Desgaste de Ferramenta	39
4.9. Cavaco.....	61
5. DISCUSSÕES.....	65
5.1. Comparação entre os Microconstituintes	65
5.2. Ensaio de Usinagem.....	65
5.2.1. Comparação entre Forças de Avanço Corrigidas em relação à Velocidade de Corte.....	66
5.2.2. Comparação entre Forças de Avanço Corrigidas em relação à Ferramenta	67

5.2.3. Comparação entre Pressões de Corte Experimentais	
em relação à Velocidade de Corte.....	68
5.2.4. Comparação entre Pressões de Corte Experimentais	
em relação à Ferramenta	69
5.3. Rugosidade.....	70
5.3.1. Comparação entre Rugosidades Médias	
em relação à Velocidade de Corte.....	70
5.3.2. Comparação entre Rugosidades Médias	
em relação à Ferramenta	72
5.4. Desgaste de Ferramenta	74
5.5. Cavaco.....	75
6. CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1.1.</i> Microestruturas otimizadas para usinagem.....	08
<i>Tabela 3.1.</i> Composição química nominal (% em massa) do material estudado, a porcentagem de ferro é complementar.....	10
<i>Tabela 4.1.</i> Medições da fração volumétrica de perlita.....	21
<i>Tabela 4.2.</i> Média e desvio padrão para o a fração volumétrica de perlita.....	21
<i>Tabela 4.3.</i> Medições do tamanho médio de grão.....	22
<i>Tabela 4.4.</i> Média e desvio padrão para o tamanho médio de grão.....	23
<i>Tabela 4.5.</i> Medição da dureza nas seções longitudinal e transversal.....	23
<i>Tabela 4.6.</i> Média e desvio padrão para a dureza geral da amostra.....	24
<i>Tabela 4.7.</i> Dados obtidos nas medições da microdureza instrumentada das inclusões de MnS. Onde: carga máxima (Pmax), profundidade final da indentação (hf), profundidade máxima (hmax), módulo de elasticidade (E), dureza Vickers (HV), dureza plástica (HP) e dureza universal (HU).....	25
<i>Tabela 4.8.</i> Dados obtidos nas medições da microdureza instrumentada da ferrita. Onde: carga máxima (Pmax), profundidade final da indentação (hf), profundidade máxima (hmax), módulo de elasticidade (E), dureza Vickers (HV), dureza plástica (HP) e dureza universal (HU).....	27
<i>Tabela 4.9.</i> Dados obtidos nas medições da microdureza instrumentada da perlita. Onde: carga máxima (Pmax), profundidade final da indentação (hf), profundidade máxima (hmax), módulo de elasticidade (E), dureza Vickers (HV), dureza plástica (HP) e dureza universal (HU).....	28
<i>Tabela 4.10.</i> Ensaios de usinagem. Onde: profundidade de corte (ap), força de corte (Fc), força de avanço (Fa), pressão de corte experimental (Kse) e força de avanço corrigida (Fa-corrigida).....	30
<i>Tabela 4.11.</i> Média e desvio padrão para as condições em estudo.....	31
<i>Tabela 4.12.</i> Resultados para Ra (rugosidade média), Rt (rugosidade total) e Rp (rugosidade máxima), para as condições estudadas.....	35
<i>Tabela 4.13.</i> Média e desvio padrão para as condições em estudo.....	36

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1.</i> Esquema da ferramenta e da formação de cavaco no processo usinagem por torneamento (a). Principais áreas de interesse na usinagem (b).....	02
<i>Figura 1.2.</i> Formação de aresta postiça.	03
<i>Figura 1.3.</i> Força de usinagem e suas componentes na operação de torneamento.....	04
<i>Figura 3.1.</i> Porta-ferramentas instrumentado.	15
<i>Figura 3.2.</i> Esquema e disposição dos extensômetros no porta ferramentas instrumentado. R de 1 a 16 são os extensômetros.....	16
<i>Figura 3.3.</i> Conjunto de equipamentos utilizados nas medidas de força de corte. (a) Sistema de aquisição ligado a microcomputador no carrinho. (b) Mini torno-fresadora.	16
<i>Figura 4.1.</i> (a) e (b) Presença de inclusões no aço estudado. Seta indica a inclusão de sulfeto de manganês (regiões escuras).	19
<i>Figura 4.2.</i> (a) e (b) Seções longitudinal e (c) e (d) transversal do aço estudado. Ataque: Nital. Microscopia óptica. Ressaltam-se: perlita (regiões enegrecidas) e ferrita (regiões esbranquiçadas)	20
<i>Figura 4.3.</i> Força de avanço corrigida em função da velocidade de corte para cada condição de ferramenta.	32
<i>Figura 4.4.</i> Pressão de corte experimental (K_{se}) em função da velocidade de corte para cada condição de ferramenta.	32
<i>Figura 4.5.</i> Força de avanço corrigida em função da condição da ferramenta para cada velocidade de corte.	33
<i>Figura 4.6.</i> Pressão de corte experimental (K_{se}) em função da condição da ferramenta para cada velocidade de corte.	33
<i>Figura 4.7.</i> Rugosidade média (R_a) em função da velocidade de corte para cada condição de ferramenta.	36

<i>Figura 4.8.</i> Rugosidade total (Rt) em função da velocidade de corte para cada condição de ferramenta.	37
<i>Figura 4.9.</i> Rugosidade máxima (Rp) em função da velocidade de corte para cada condição de ferramenta.	37
<i>Figura 4.10.</i> Rugosidade média (Ra) em função da condição da ferramenta para cada velocidade de corte.	38
<i>Figura 4.11.</i> Rugosidade total (Rt) em função da condição da ferramenta para cada velocidade de corte.	38
<i>Figura 4.12.</i> Rugosidade máxima (Rp) em função da condição da ferramenta para cada velocidade de corte.	39
<i>Figura 4.13.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta não recoberta (1° ensaio). (a) vista superior. Microscopia Óptica. (b) vista em perfil. (c) e (d) vista em perfil. MEV.	41
<i>Figura 4.14.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta não recoberta (2° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	42
<i>Figura 4.15.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta não recoberta (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	42
<i>Figura 4.16.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta recoberta (1° ensaio). (a) vista superior. Microscopia Óptica. (b) vista em perfil. (c) e (d) vista em perfil. MEV.	43
<i>Figura 4.17.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta recoberta (2° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	44
<i>Figura 4.18.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta recoberta (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	44

<i>Figura 4.19.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta comercial (1° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	45
<i>Figura 4.20.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta comercial (2° ensaio). (a) vista superior. Microscopia Óptica. (b) vista em perfil. (c) e (d) vista em perfil. MEV.	46
<i>Figura 4.21.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta comercial (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	47
<i>Figura 4.22.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta não recoberta (1° ensaio). (a) vista superior. Microscopia Óptica. (b) vista em perfil. (c) e (d) vista em perfil. MEV.	48
<i>Figura 4.23.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta não recoberta (2° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	49
<i>Figura 4.24.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta não recoberta (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	49
<i>Figura 4.25.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta recoberta (1° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	50
<i>Figura 4.26.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta recoberta (2° ensaio). (a) vista superior. Microscopia Óptica. (b) vista em perfil. (c) e (d) vista em perfil. MEV.	51
<i>Figura 4.27.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta recoberta (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	52
<i>Figura 4.28.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta comercial (1° ensaio). (a) vista superior. Microscopia Óptica. (b) vista em perfil. (c) e (d) vista em perfil. MEV.	53

<i>Figura 4.29.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta comercial (2° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	54
<i>Figura 4.30.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta comercial (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	54
<i>Figura 4.31.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta não recoberta (1° ensaio). (a) vista superior. Microscopia Óptica. (b) vista em perfil. (c) e (d) vista em perfil. MEV.	55
<i>Figura 4.32.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta não recoberta (2° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	56
<i>Figura 4.33.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta não recoberta (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.....	56
<i>Figura 4.34.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta recoberta (1° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	57
<i>Figura 4.35.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta recoberta (2° ensaio). (a) vista superior. Microscopia Óptica. (b) vista em perfil. (c) e (d) vista em perfil. MEV.	58
<i>Figura 4.36.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta recoberta (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	59
<i>Figura 4.37.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta comercial (1° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	59
<i>Figura 4.38.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta comercial (2° ensaio). (a) vista superior. Microscopia Óptica. (b) vista em perfil. (c) e (d) vista em perfil. MEV.	60

<i>Figura 4.39.</i> Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta comercial (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.	61
<i>Figura 4.40.</i> Cavaco gerado no torneamento a 10m/min e ferramenta não recoberta.	61
<i>Figura 4.41.</i> Cavaco gerado no torneamento a 10m/min e ferramenta recoberta.	62
<i>Figura 4.42.</i> Cavaco gerado no torneamento a 10m/min e ferramenta comercial.	62
<i>Figura 4.43.</i> Cavaco gerado no torneamento a 100m/min e ferramenta não recoberta.	62
<i>Figura 4.44.</i> Cavaco gerado no torneamento a 100m/min e ferramenta recoberta.	63
<i>Figura 4.45.</i> Cavaco gerado no torneamento a 100m/min e ferramenta comercial.	63
<i>Figura 4.46.</i> Cavaco gerado no torneamento a 300m/min e ferramenta não recoberta.	63
<i>Figura 4.47.</i> Cavaco gerado no torneamento a 300m/min e ferramenta recoberta.	64
<i>Figura 4.48.</i> Cavaco gerado no torneamento a 300m/min e ferramenta comercial.	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Ra - rugosidade média	[μm]
Rp - rugosidade máxima	[μm]
Rt - rugosidade total	[μm]
T - vida da ferramenta	[min]
Vc - velocidade de corte	[m/min]
C - comprimento da circunferência-gabarito	[cm]
R - raio da circunferência-gabarito	[cm]
t - tamanho de grão médio	[μm]
x - número de intersecções com o traçado da circunferência-gabarito	
Vc - velocidade de corte	[m/min]
D - diâmetro do corpo-de-prova	[mm]
N - rotação	[rpm]
t' - tempo de ensaios	[min]
c - comprimento de avanço longitudinal no corpo-de-prova	[mm]
f - avanço	[mm/volta]
ap - profundidade de corte	[mm]
$\bar{x}$ - média amostral	
s - desvio-padrão amostral	
n - número de elementos da amostra	
$t_{n-1,\alpha/2}$ - variável t-Student	
α - probabilidade complementar do intervalo do parâmetro	[%]
Pmax - carga máxima	[mN]
hf - profundidade final da indentação	[μm]
hmax - profundidade máxima	[μm]
E - módulo de elasticidade	[GPa]
HV - dureza Vickers	[GPa]
HP - dureza plástica	[GPa]
HU - dureza universal	[GPa]
Kse - pressão de corte experimental	[N/mm ²]

Fc - força de corte	[N]
Fa - força de avanço	[N]
Fa (corrigida) - força de avanço corrigida	[N]

1. INTRODUÇÃO

1.1. Torneamento

Usinagem é um termo que cobre vários processos de manufatura que envolvem remoção de material. Esta remoção de material visa: obtenção das formas finais, acabamento superficial adequado e se alcançar os valores de tolerância requeridos [1]. Quase todos os produtos manufaturados têm componentes que foram usinados.

O processo de usinagem depende de variáveis independentes de entrada, de variáveis dependentes e de interações entre as variáveis [2, 3]. As variáveis independentes de entrada são: a) o material a ser usinado; b) a geometria de partida do material; c) seleção do processo de usinagem; d) ferramenta de corte recoberta ou não; e) parâmetros de corte; f) geometria da ferramenta; g) fluido de corte. Já as variáveis dependentes são principalmente: a) forças de corte, avanço e passiva (forças de usinagem), as quais estão relacionadas com a velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, ferramenta, fluido e material usinado; b) acabamento superficial; c) desgaste. O desgaste da ferramenta, ou até mesmo falha da mesma, é de grande importância e influencia diretamente no acabamento superficial. A rugosidade está relacionada com a integridade da superfície, sendo um dos aspectos mais importante a serem avaliados em uma superfície usinada [4]. A rugosidade é caracterizada pela presença de sulcos formados pela ferramenta durante o corte. A rugosidade é analisada principalmente em termos de parâmetros como rugosidade média (R_a), rugosidade máxima (R_p), rugosidade total (R_t). Modelos associando a rugosidade com força de corte, entre outros parâmetros de usinagem, têm sido propostos na literatura [5, 6, 7, 8, 9].

Dentre os processos de usinagem estão o torneamento, fresamento e furação [1, 10, 11]. Cada um desses processos apresenta características específicas. Este texto dará ênfase ao processo de torneamento, que está relacionado com o objetivo deste trabalho.

O processo de torneamento consiste na utilização de ferramentas com corte em um único ponto, o qual é fixo. A ferramenta remove material de uma peça que

gira. Dos parâmetros que regem o processo de torneamento, é imperioso, dada a relevância, destacar três, a saber: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. A velocidade de corte é a velocidade instantânea do movimento de corte, no ponto de corte, geralmente expressa em ft/min ou m/min. O avanço consiste na distância percorrida pela ferramenta na direção axial a cada revolução, medida no plano de trabalho. A profundidade de corte é a espessura de material removido da peça, medida na direção radial, ou seja, é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho [12]. O produto desses três parâmetros resulta na taxa de remoção de material, que é geralmente utilizada na medição da eficiência do processo de usinagem (usinabilidade) [13]. No processo de corte, segundo Shaw [4] existem três áreas de interesse na região ferramenta-material. A **figura 1.1** mostra essas áreas. A primeira área se estende ao longo do plano de cisalhamento e forma a fronteira entre a região deformada e não deformada do material metálico. A segunda região está entre o cavaco e a face da ferramenta e a terceira esta entre a superfície usinada e o material adjacente a esta superfície. Na primeira área, o interesse está focado nas características, ou mecanismos, de deformação plástica do material. Já na segunda, o atrito e o desgaste da ferramenta ou da combinação ferramenta-material. O desgaste da ferramenta pode ocorrer de várias formas (desgaste adesivo, abrasivo, por difusão ou fadiga), ocorrendo interação como o meio. Na terceira região, o interesse está na qualidade da superfície produzida e na rugosidade.

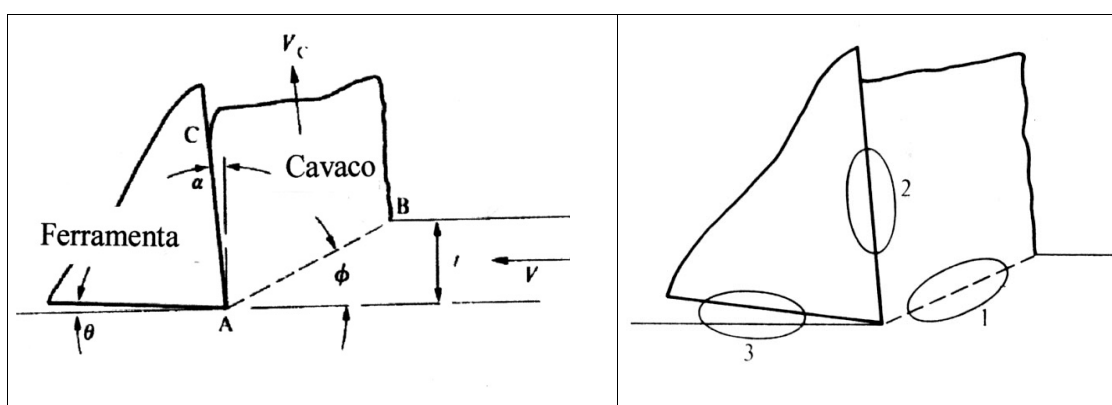


Figura 1.1. Esquema da ferramenta e da formação de cavaco no processo usinagem por torneamento (a). Principais áreas de interesse na usinagem (b).[4]

Cavaco é o material produzido durante o corte nos processos de usinagem. Em princípio, o cavaco é assumido como sendo uma fita contínua de largura constante, com um plano de cisalhamento bem definido, o que na verdade não ocorre [4]. A formação de cavaco ocorre pelo recalque do material contra a superfície de saída da ferramenta e é um fenômeno cíclico. A deformação concentra-se na região onde ocorre cisalhamento e, quando a deformação nessa região assume um valor crítico, o processo reinicia-se. Isso resulta na formação de uma série de segmentos discretos dentro do cavaco. O cavaco é consideravelmente variável em forma, tamanho e continuidade em processos de usinagem. Cavacos de ferro fundido cinzento, por exemplo, são sempre fragmentados, e cavacos de materiais mais dúcteis podem ser produzidos em segmentos, particularmente a reduzidas velocidades. O cavaco descontínuo tem a vantagem prática de permitir facilmente sua remoção da área de corte. Contudo, na maioria das condições de corte, metais dúcteis e ligas não fraturam no plano de cisalhamento, produzindo-se, assim, cavaco contínuo [13].

Pode também ocorrer, durante o processo de usinagem, a formação de aresta postiça. A formação de aresta postiça é ilustrada na **figura 1.2**. A aresta postiça é uma porção do cavaco que fica aderida à superfície de saída da ferramenta. Salienta-se que a formação da aresta postiça não é constatada na usinagem de metais puros, entretanto ocorre freqüentemente com ligas utilizadas na indústria [13].

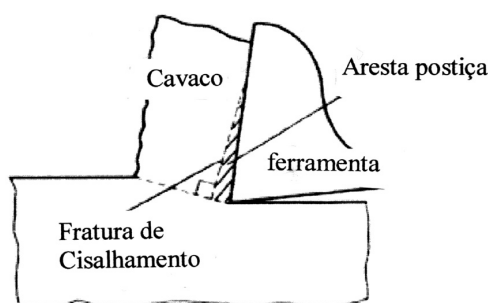


Figura 1.2. Formação de aresta postiça [9].

A formação de aresta postiça é favorecida quando a usinagem é feita em velocidades de corte relativamente baixas, não havendo grande aumento de temperatura na interface material-ferramenta. À medida que a velocidade de corte

aumenta, a temperatura na ponta da ferramenta também aumenta, causando diminuição da aresta postiça. Contudo, a exata faixa de velocidades para a qual não há o surgimento da aresta postiça depende do tipo de liga a ser usinada e também do avanço empregado no processo de usinagem [13].

A força de usinagem é dada pela resultante dos esforços que atuam sobre a cunha cortante. Na verdade, não se trabalha com a força de usinagem propriamente dita, mas sim com suas componentes. A **figura 1.3** ilustra a força de usinagem e suas componentes na operação de torneamento. Esses esforços variam durante o processo de usinagem e podem ser utilizados para estudar os mecanismos de formação de cavaco [7, 14, 15].

Influenciam nas forças de usinagem: composição química e microestrutura do material e geometria da ferramenta. No que tange a geometria da ferramenta, um dos parâmetros mais importantes é o ângulo de saída, que, ao ser aumentado, diminui simultaneamente as forças de corte e de avanço, mas reduz a resistência da ponta da ferramenta, podendo ocorrer fratura da mesma [13]. Fatores metalúrgicos, como taxa de encruamento do material da peça, também são relevantes. Se o material apresentar elevado encruamento durante a usinagem, as forças durante o corte também aumentarão.

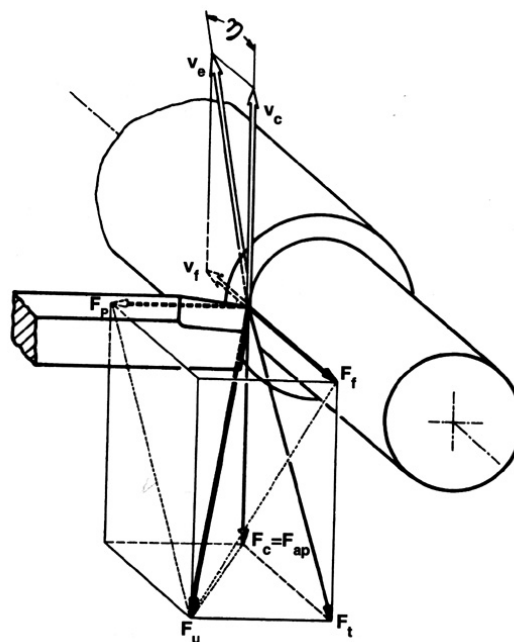


Figura 1.3. Força de usinagem e suas componentes na operação de torneamento [11]

As medidas de força de usinagem podem ser realizadas acoplando um porta-ferramentas instrumentado com sensores capazes de medir, direta ou indiretamente, as componentes da força de usinagem. O sinal dos sensores é conectado a uma interface, que amplifica e filtra os sinais, que está ligada a um microcomputador. Esses sensores podem ser sensores piezelétricos [16, 4, 6, 14] ou extensômetros [11, 17]. Vários trabalhos [6, 18, 19, 20, 21, 22] têm sido realizados no sentido de usar a força de corte como forma de avaliar o processo de usinagem. Esses trabalhos têm diferentes abordagens, onde as forças de corte são correlacionadas com parâmetros que vão desde rugosidade, desgaste de ferramenta até microestrutura e propriedades mecânicas.

1.2. Desgaste e Vida da Ferramenta

Por vida da ferramenta, compreende-se a quantidade de material removido por uma ferramenta sob determinadas condições de usinagem até o instante em que tal ferramenta se torne inoperante ou atinja níveis de desgaste incompatíveis à continuidade da operação [4]. Devido à grande implicância de seu desempenho na usinagem, mais especificamente no torneamento, é patente que a concepção de ferramentas de corte não é meramente uma questão de ângulos ou perfis em escalas macrométricas, mas também de inspeção e controle da forma de seu contorno em uma escala mais acurada, dentro de alguns micrometros. Em uma avaliação mais generalista, é possível identificar e catalogar alguns tipos de desgaste que ocorrem nos materiais [4]:

1. Desgaste por Atrito: associado à adesão de pequenas partículas sobre a face do material, com formação de acúmulo de material em certas regiões.
2. Desgaste Abrasivo: deve-se, sobretudo, à ação de corte de partículas com expressiva dureza.
3. Desgaste Erosivo: ocorre devido à ação de corte de partículas imersas em fluidos.
4. Desgaste Difusivo: ocorre quando a operação impõe elevadas temperaturas à superfície do material.

5. Desgaste Corrosivo: ocorre quando há ataque químico da superfície.
6. Desgaste por Fratura: ocorre quando há ruptura de superfícies de materiais frágeis.

Salienta-se, contudo, que raramente apenas um desses tipos de desgaste estão envolvidos nas situações práticas, pois o mais importante são suas interações e os efeitos que delas advêm. Ao tratar-se de ferramentas de corte, mais especificamente ferramentas para o processo de usinagem, os tipos de desgaste associados podem ser [4]: desgaste por adesão, desgaste abrasivo, desgaste por difusão, desgaste por fadiga, desgaste por micro-ruptura, desgaste por fratura e, por fim, desgaste devido à deformação plástica. Destacando-se, novamente, que todos estes tipos de desgaste estão geralmente presentes em combinação entre si, sendo o mecanismo de desgaste predominante da interação dependente das condições da operação de corte.

1.3. Usinabilidade

A usinabilidade de um material, bem como outras propriedades de fabricação, são tão importantes como as propriedades mecânicas. Na verdade, a usinabilidade descreve genericamente as características operacionais da ferramenta de corte [2]. A usinabilidade de um material metálico é influenciada por vários fatores tais como: composição química, microestrutura, resistência do material, avanço utilizado na usinagem, velocidade de corte, penetração e escolha do fluido de corte [2, 3]. Há três aspectos que caracterizam, por assim dizer a usinabilidade, que são a vida da ferramenta, acabamento superficial e esforços requeridos para o corte. Assim, a usinabilidade pode ser definida com auxílio de alguns critérios tais como vida e desgaste da ferramenta, acabamento superficial, remoção de cavaco, velocidade de corte e produtividade. A usinabilidade também depende de variáveis do processo de usinagem, tais como rigidez da ferramenta, geometria e material da ferramenta, tipo do fluido de corte e tipo da operação de usinagem. Trent [13] ainda acrescenta como parâmetros potencialmente mensuráveis e eficazes na quantificação da usinabilidade: a forma do cavaco e a máxima taxa de remoção de material.

Existem vários testes para avaliar a usinabilidade de um material. Esses ensaios são importantes para comparar materiais e também para otimizar os

processos de usinagem. Os primeiros ensaios de usinabilidade foram realizados no século passado por Taylor [2, 11]. Nesse ensaio era determinada a velocidade de corte que causava a falha da ferramenta após 20 minutos (V20). A partir desses ensaios ficou determinada a relação empírica:

$$T.Vc^n = C$$

Onde T é a vida da ferramenta em minutos.

Vc é a velocidade de corte (m/min).

C e n são constantes empíricas obtidas experimentalmente.

Trabalho realizado por Dimla et al. [19, 20] faz uma revisão e avaliação dos diversos métodos que são utilizados para se avaliar o processo de usinagem e que dão indicações da usinabilidade do material. Dentre esses métodos estão a emissão acústica, determinação da temperatura da ferramenta, força de corte e vibrações. A utilização de ultra-som, acabamento superficial também são indicados.

1.4. Usinabilidade de Aços Carbono.

Usinabilidade dos aços carbono é influenciada pelos elementos de liga. Tais elementos (manganês, carbono, cromo, etc) quando adicionados ao aço, aumentam a resistência, o que influencia a ação das tensões na ferramenta e as temperaturas geradas durante a operação. Há alteração também na força de usinagem, por exemplo, o efeito da adição de cobre ou alumínio ao aço reduz as forças de corte, avanço e passiva, se as mesmas são comparadas ao aço isento de elementos de liga [13]. O aumento das frações volumétricas de perlita aumenta o desgaste da ferramenta. Por outro lado, maiores teores de ferrita propiciam a formação de aresta postiça. A existência de uma perlita grosseira resulta na melhora da usinabilidade [2]. A **tabela 1.1** apresenta a relação entre o teor de carbono com as microestruturas otimizadas para usinagem.

Tabela 1.1 Microestruturas otimizadas para usinagem [2].

% Carbono	Microestrutura otimizada
0,06-0,20	Laminado (mais econômico)
0,20-0,30	Acima de 3 polegadas, normalizado; menores dimensões como laminado
0,30-0,40	Recozido (perlita grosseira, fração mínima de ferrita)
0,40-0,60	Perlita lamelar grosseira até esferoidizada.
0,60-1,00	100% de perlita esferoidizada, de grosseira à fina.

As inclusões de MnS e de fósforo, diminuindo geralmente a formação de aresta postiça, melhoram o acabamento superficial. Usualmente, os teores máximos de enxofre não passam de 0,05%. Em aços ressulfurados este valor está entre 0,08% e 0,13%, embora em alguns casos pode-se chegar a 0,35%. As inclusões de sulfeto de manganês, dependendo de seu tamanho, forma e orientação influenciam na usinabilidade [2].

2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é estudar avaliação da usinabilidade em torneamento de aço ABNT 1045, para diferentes velocidades de corte e ferramentas, para isso este trabalho de formatura tem por objetivos secundários:

1. Caracterizar microestruturalmente o aço ABNT 1045, em estudo, mediante a determinação da dureza Vickers, microdureza, fração volumétrica de perlita e tamanho de grão.
2. Realizar ensaios para avaliar a usinabilidade utilizando diferentes velocidades de corte no torneamento do aço ABNT 1045. São utilizadas 3 velocidades de corte, a saber: 10, 100 e 300m/min. Avalia-se a usinabilidade pelas forças de corte e avanço e também pelo acabamento superficial (rugosidade).
3. Realizar ensaios para avaliar a usinabilidade variando o tipo de ferramenta para as 3 velocidades de corte utilizadas. São utilizadas pastilhas planas e triangulares de metal duro com e sem recobrimento.
4. Avaliar as ferramentas, utilizando principalmente um microscópio estereoscópico, microscópio óptico e microscopia eletrônica de varredura.
5. Analisar os resultados dos ensaios, utilizando ferramentas estatísticas para se descrever tendências simplificadas de comportamento em função dessas variáveis para o aço estudado.
6. Analisar qualitativamente os diferentes tipos de desgastes e avarias encontrados nas ferramentas de corte e as características do cavaco produzido, para cada condição de ensaio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Material

O aço utilizado neste trabalho tem composição base do ABNT 1045. A fração volumétrica de perlita pode variar em aproximadamente 10% dentro da faixa de composição especificada para o aço ABNT 1045. Esse valor pode ser obtido utilizando o diagrama Fe-C. A **tabela 3.1** apresenta a composição química nominal do material avaliado.

Tabela 3.1. Composição química nominal (% em massa) do material estudado, a porcentagem de ferro é complementar.

Elemento	1045 max	1045 min
C	0,5	0,43
Ni	0,25	0
Si	0,35	0,15
Mo	0,06	0
Mn	0,9	0,6
Cr	0,2	0

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterização do Aço ABNT 1045

A caracterização dos aços estudados consistiu na análise microestrutural após preparação metalográfica e medidas de dureza e de microdureza.

3.2.1.1. Determinação da Dureza Vickers (HV 30)

A dureza Vickers foi determinada nas seções transversais e longitudinais da barra laminada do aço estudado. Foi utilizado o durômetro Struers do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), EPUSP. A carga utilizada foi de 30 kgf. Essas medidas foram realizadas para caracterizar o material utilizado nos ensaios.

3.2.1.2. Determinação da Microdureza (HV)

A microdureza foi determinada em regiões tanto da seção transversal quanto da seção longitudinal da barra laminada do aço estudado em pontos aleatoriamente escolhidos na superfície do corpo-de-prova onde se identificavam claramente as diferentes fases (ferrita e perlita). Foi utilizado o microdurômetro Fischer do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), EPUSP, o qual é dotado de microscópio óptico, microcomputador, visor e posicionador de amostra a escalas micrométricas. A carga utilizada foi de 15mN para os ensaios de dureza na perlita e na ferrita e de 20mN para os ensaios de dureza nas inclusões. Com este tipo de ensaio, além da dureza convencional, também é possível obter informações a respeito do módulo de elasticidade (E), dureza plástica (HP) e dureza universal do material (HU).

3.2.1.3. Metalografia

A preparação metalográfica consistiu em lixamento, polimento e ataque metalográfico com o reagente Nital 3%, para posterior observação utilizando o microscópio óptico Olympus, no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), EPUSP. Essas observações foram realizadas para caracterizar o material utilizado nos ensaios.

3.2.1.4. Microscopia Óptica e Eletrônica de Varredura

Para a caracterização microestrutural do aço estudado e do desgaste das ferramentas foram utilizados um microscópio óptico da marca Olympus, um microscópio estereoscópico da marca Olympus, modelo: BX 60M, e um microscópio eletrônico de varredura da marca Philips, modelo: XL-30. Sendo os dois primeiros pertencentes ao Laboratório de Fenômenos e Superfícies (LFS), EPUSP, e o último pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, EPUSP.

3.2.1.5. Determinação da Fração Volumétrica de Perlita

A fração volumétrica de perlita foi determinada por metalografia quantitativa, utilizando uma grade de 100 pontos. Para avaliar a porcentagem, procedeu-se da seguinte forma: os pontos que coincidiam com a estrutura da perlita foram considerados como sendo perlita e, dessa forma, pôde-se estimar a fração volumétrica de perlita na microestrutura do material [2]. Também foi utilizado o programa Leica (Qwin) para avaliar a fração volumétrica da fase.

3.2.1.6. Determinação do Tamanho de Grão

O tamanho de grão do aço foi determinado por metalografia quantitativa, utilizando uma circunferência-gabarito de raio 4cm. Para a estimativa do tamanho de grão, procedeu-se da seguinte forma: foram registradas para cada amostra quantas intersecções havia entre os contornos de grão e interfaces (ferrita-perlita) e o traçado da circunferência. Esta análise foi feita sob ampliações de 500 vezes, por isso a escala, em que as estruturas eram observadas, encontrava-se na faixa de 20 μ m e, após simples medição com régua, pôde-se inferir a correspondência de 20 μ m – 1,6cm. Isso feito, mais a relação de comprimento de circunferência dada por: $C = 2\pi R$ e, por fim, uma simples regra de três, chega-se à relação que estima o

tamanho de grão: $t = \frac{8\pi \cdot 20}{1,6 \cdot x}$, onde t expressa o tamanho de grão médio dado em μm e x é o número de intersecções (contornos de grão e interfaces) com o traçado da circunferência-gabarito [2].

3.2.2. Preparação de Corpos-de-Prova para Ensaios de Usinagem

As barras de aço ABNT 1045 foram torneadas com a utilização de um mini torno-fresadora da marca CNC, que possui um comando numérico compacto e embutido na própria máquina. As principais especificações técnicas do equipamento, considerando algumas destas referentes apenas ao módulo do torno, são: dimensão da mesa (250x295mm), curso do carro longitudinal (230mm), curso do carro transversal (100mm), curso do carro vertical (80mm), diâmetro máximo admissível sobre o barramento (100mm), variação contínua de velocidade no cabeçote do torno (0-4000rpm), avanço rápido longitudinal (10000mm/min), avanço rápido transversal (10000mm/min), avanço rápido vertical (10000mm/min) motor principal do cabeçote do torno (0,4KW), servomotor AC para o eixo longitudinal (0,4KW), servomotor AC para o eixo transversal (0,4KW), servomotor AC para o eixo vertical (0,4KW), área ocupada (740x1970mm) e peso aproximado (600Kg). Simultaneamente à operação de usinagem, há a aquisição das forças de corte e avanço, como descrito no item subsequente. Em termos industriais, as máquinas de comando numérico têm a vantagem de serem flexíveis, permitirem a usinagem de perfis complexos e com melhoria notável na qualidade da peça final, serem precisas e capazes de repetibilidade, terem menor necessidade de controle de qualidade, permitirem uma velocidade de produção elevada e, por fim, terem custos reduzidos de armazenamento e ferramental. Em contrapartida, suas desvantagens são: elevado investimento inicial, elevados custos de manutenção e inviabilidade para baixos níveis de produção. Para este trabalho, as maiores exigências quanto ao maquinário foram, sobretudo, precisão e repetibilidade.

3.2.3. Ensaios de Usinagem

Foram realizadas operações de torneamento com três velocidades de corte distintas, a saber: 10, 100 ou 300m/min, variando para cada uma delas a ferramenta utilizada, cujas condições foram: não recoberta, recoberta e comercial, totalizando, portanto, 9 condições de estudo distintas. Objetivando-se a representatividade estatística, para cada condição, foram realizados 3 ensaios, ou seja, foram usinados 27 corpos-de-prova no total. Utilizando a relação $V_c = \frac{\pi DN}{1000}$, pode-se determinar as

três rotações de ensaio correspondentes às velocidades de corte, uma vez que a dimensão do corpo-de-prova estava em torno de aproximadamente 50mm de diâmetro. Dessa forma, às velocidades de 10, 100 e 300m/min, correspondem as seguintes rotações: 64, 640 e 1910rpm. Os parâmetros de corte utilizados foram: avanço de 0,05 mm/volta, profundidades de corte que variaram de aproximadamente 0,4 mm no raio do corpo-de-prova. A fim de se avaliar o desgaste da ferramenta após o torneamento, estabeleceram-se ensaios com duração de 3 minutos, porém, uma vez que há três velocidades de corte diferentes, há três comprimentos de avanço longitudinal nos corpos-de-prova necessários para proporcionar uma duração de ensaio compatível à estipulada. Considerando a relação: $t' = \frac{\pi \cdot D \cdot c}{1000 \cdot f \cdot V_c}$, onde t'

representa o tempo de ensaio em minutos, D é o diâmetro do corpo-de-prova, c representa o comprimento de avanço longitudinal no corpo-de-prova, f é o avanço e V_c representa a velocidade de corte; é possível determinar que, para a velocidade de corte de 10m/min, o comprimento de avanço longitudinal no corpo-de-prova deve ser de aproximadamente 9,5mm (passe único), para a velocidade de corte de 100m/min, o comprimento de avanço longitudinal no corpo-de-prova deve ser de aproximadamente 96mm (obtidos em dois passes) e, por fim, para a velocidade de corte de 300m/min, o comprimento de avanço longitudinal no corpo-de-prova deve ser de aproximadamente 286,5mm (obtidos em 5 passes).

3.2.4. Avaliação da Força de Usinagem - Torneamento.

A força de corte e de avanço foram medidas utilizando o dispositivo apresentado na **figura 3.1**, que é um porta-ferramentas instrumentado com extensômetros (dinamômetro) para medição da força de usinagem. Para armazenamento e tratamento dos dados foi utilizado um computador.

A aquisição dos dados foi feita utilizando-se um sistema que apresenta uma configuração inicial (taxa de aquisição; tempo de aquisição; tipos de filtros; configuração dos canais; tipo de instrumentação, no caso extensômetros). O software utilizado foi o Aqdados (software da Lynx Eletrônica Ltda). Esse software foi instalado em um microcomputador alocado para o sistema de aquisição e para o dispositivo para medir as forças de corte. O instrumento de medição (porta-ferramentas instrumentado) fica ligado ao sistema de aquisição (placa de aquisição de dados e módulos com filtros e amplificadores - ADS 2000). Para a calibração do porta-ferramentas instrumentado, apresentado na **figura 3.1**, tem sido utilizado um dinamômetro em contato com o mesmo. Durante a calibração a relação entre a força e a tensão é inserida no software do sistema de aquisição. O esquema do dispositivo e a disposição dos extensômetros são apresentados na **figura 3.2**. Na **figura 3.3** é apresentado o conjunto de equipamentos utilizados nas medidas de força de corte.

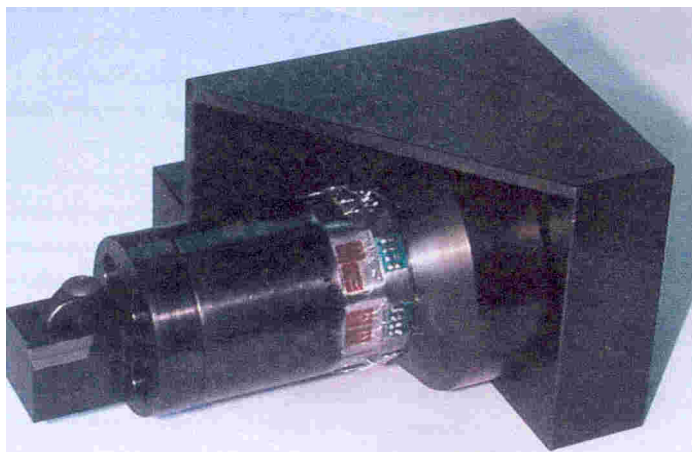


Figura 3.1. Porta-ferramentas instrumentado.

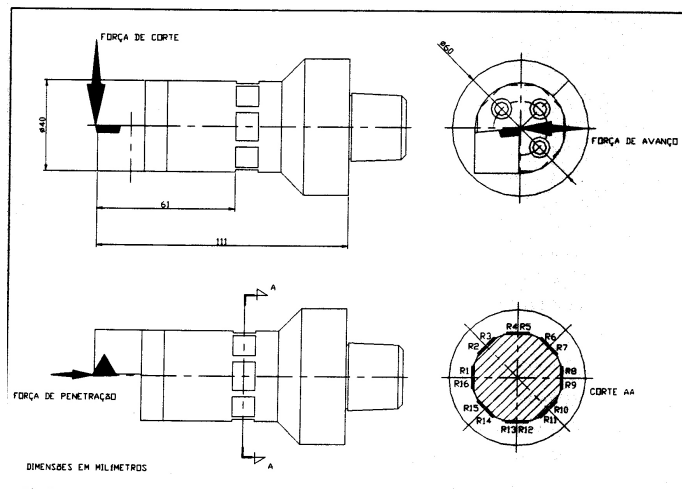


Figura 3.2. Esquema e disposição dos extensômetros no porta ferramentas instrumentado. R de 1 a 16 são os extensômetros.

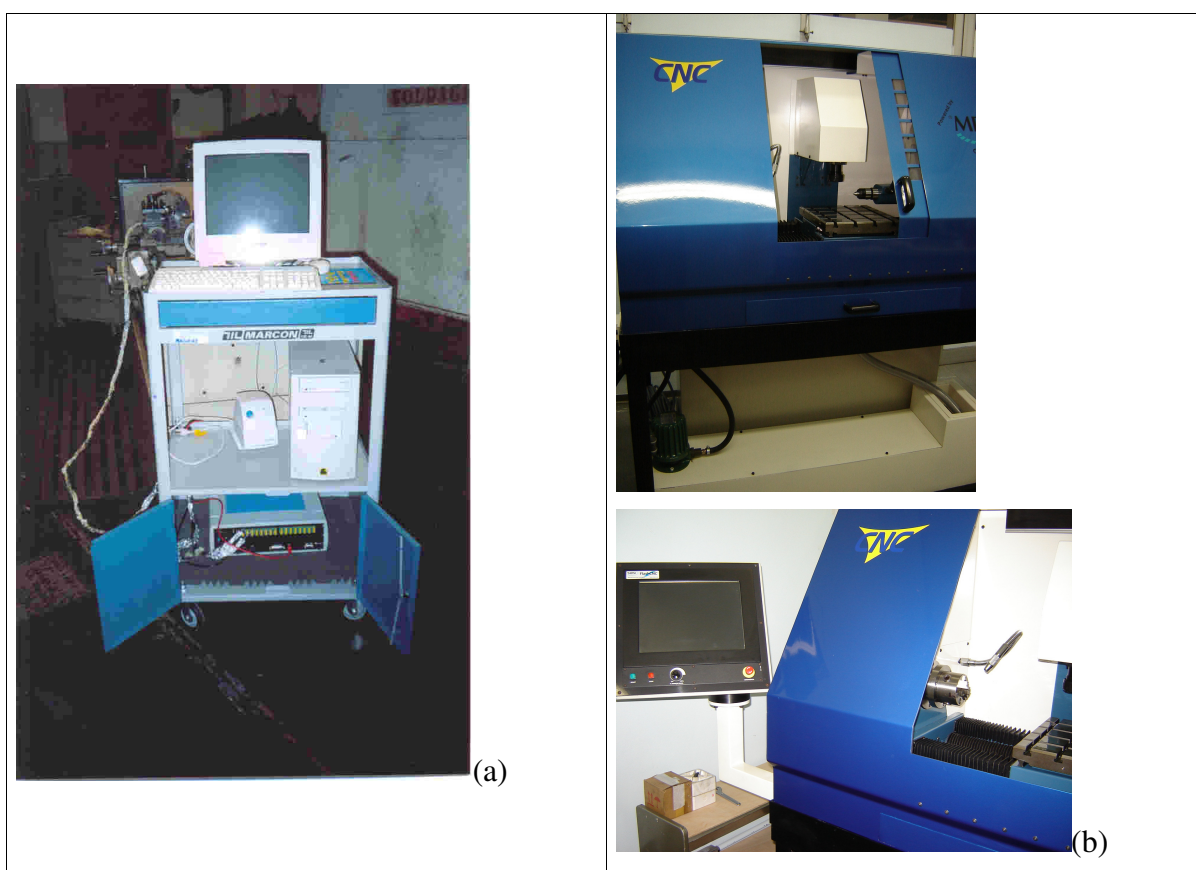


Figura 3.3. Conjunto de equipamentos utilizados nas medidas de força de corte. (a) Sistema de aquisição ligado a microcomputador no carrinho. (b) Mini torno-fresadora.

Foram realizados ensaios de força de corte e de avanço. A ferramenta utilizada foi de metal duro triangular plana, para se adequar ao dispositivo para medição de forças de usinagem. Os parâmetros de corte utilizados avanço (f) e profundidade de corte (ap) obedeceram à relação menor que 0,2 ($f/ap \leq 0,2$). As velocidades de corte, como já mencionado foram de: 10, 100 e 300m/min. Foram realizados 3 ensaios para cada condição, de forma a se permitir uma representatividade estatística.

3.2.5. Tipos de Ferramentas

Foram utilizadas ferramentas de metal duro, triangulares e planas. Essas ferramentas foram utilizadas em três diferentes condições: sem recobrimento (*não recobertas*), com recobrimento por deposição de filmes por CVD (*comerciais*) e recobertas por deposição de filmes por PVD, cuja técnica empregada para a deposição dos filmes foi por PVD Triodo Magnetron Sputtering – TMS (*recobertas*). As multicamadas foram obtidas alternando o gás reativo na atmosfera gasosa do plasma, nitrogênio e argônio para obter as camadas de TiN e metano (CH₄) e argônio para obter as camadas de TiC. O sputtering é um tipo de PVD (Physical Vapor Deposition), no qual os átomos que constituem o filme são arrancados fisicamente de um alvo, por impacto de íons, e, sob a forma de vapor, deslocam-se ao substrato onde se condensam na forma de um filme. O ambiente de todo o processo é mantido em baixa pressão. As pastilhas utilizadas para a condição *não recoberta* foram: TPUN 160304, BA 55 CDC, 50654940001, da fabricante Brassinter. Já as pastilhas utilizadas para a condição *recoberta* foram: TPUN 160304, BA 55 CDC, 50338562001, do fabricante Brassinter. Por fim, para a condição *comercial*, as pastilhas utilizadas foram: TPUN 160308, TPU322, 2025, 5EM932413, da fabricante SANDVIK.

3.2.6. Análise Estatística

Para os parâmetros a serem analisados e mensurados ao longo do trabalho, muitas vezes, fez-se necessário construir intervalos de confiança. Intervalos de confiança são intervalos, ou seja, faixas contínuas de valores, que deverão conter o valor verdadeiro do parâmetro a uma probabilidade conhecida [23]. Nos ensaios desenvolvidos, há duas situações importantes a se verificar: as amostras são relativamente pequenas e o desvio-padrão populacional é desconhecido (só há dados amostrais); isso implica a necessidade de introdução de uma correção, representada pela variável t-Student, chegando, assim, à seguinte relação: $\bar{x} \pm t_{n-1, \alpha/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$, onde $\bar{x}$ é a média amostral, s é o desvio-padrão amostral, n é o número de elementos da amostra e $t_{n-1, \alpha/2}$ é a variável t-Student, que possui valores tabelados e cujas entradas são: $n-1$ (número de amostras descontado de uma unidade) e $\alpha/2$ (metade do valor, em porcentagem, da probabilidade complementar do intervalo conter o real valor do parâmetro). Para todo o presente trabalho, a probabilidade do intervalo conter o valor real dos parâmetros é definida em 95%, ou seja, $\alpha = 5\%$.

Para a inferência segura de conclusões, foram feitos testes de hipóteses, cuja finalidade é a comparação de médias de parâmetros (o que permite atestar igualdade ou diferença entre eles), para as diferentes condições de ensaios. Por desconhecimento do comportamento dos parâmetros nas populações, pois só há dados amostrais, foi utilizada a distribuição t-Student. A comparação dos parâmetros deu-se por comparação entre duas variáveis: t_{calc} e t_{crit} . A variável t_{calc} é a mesma

para qualquer teste de hipótese e é dada por: $t_{calc} = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_j}{\sqrt{\frac{s_i^2}{n_i} + \frac{s_j^2}{n_j}}}$, onde $\bar{x}$ é a média

amostral, S^2 é a variância amostral e n é o número de elementos da amostra. A variável t_{crit} depende da amostra, pois é dada por: $t_{crit} = t_{n_i + n_j - 2; \frac{\alpha}{2}}$ e seu valor é obtido

na tabela de distribuição t-Student. Escolheu-se, por conveniência, $\bar{X}_i - \bar{X}_j$ de

forma que resulte num número positivo. Todos os testes foram realizados a um nível de significância de 5% ($\alpha = 5\%$).

4. RESULTADOS

Neste item são apresentados os resultados deste trabalho. Os resultados podem ser agrupados em cinco grandes grupos: Caracterização Microestrutural (item 4.1 ao 4.5), Esforço de Usinagem (item 4.6), Acabamento Superficial (item 4.7), Desgaste (item 4.8) e Cavaco (item 4.9).

4.1. Caracterização Microestrutural

A seguir são apresentadas algumas microestruturas do aço estudado. A **figura 4.1** mostra a presença de inclusões, que consistem de sulfeto de manganês. Já a **figura 4.2** apresenta as microestruturas do aço estudado após ataque metalográfico, nas quais é possível verificar a presença de: perlita (regiões enegrecidas) e ferrita (regiões esbranquiçadas).



Figura 4.1. (a) e (b) Presença de inclusões no aço estudado. A seta indica a inclusão de sulfeto de manganês (regiões escuras).

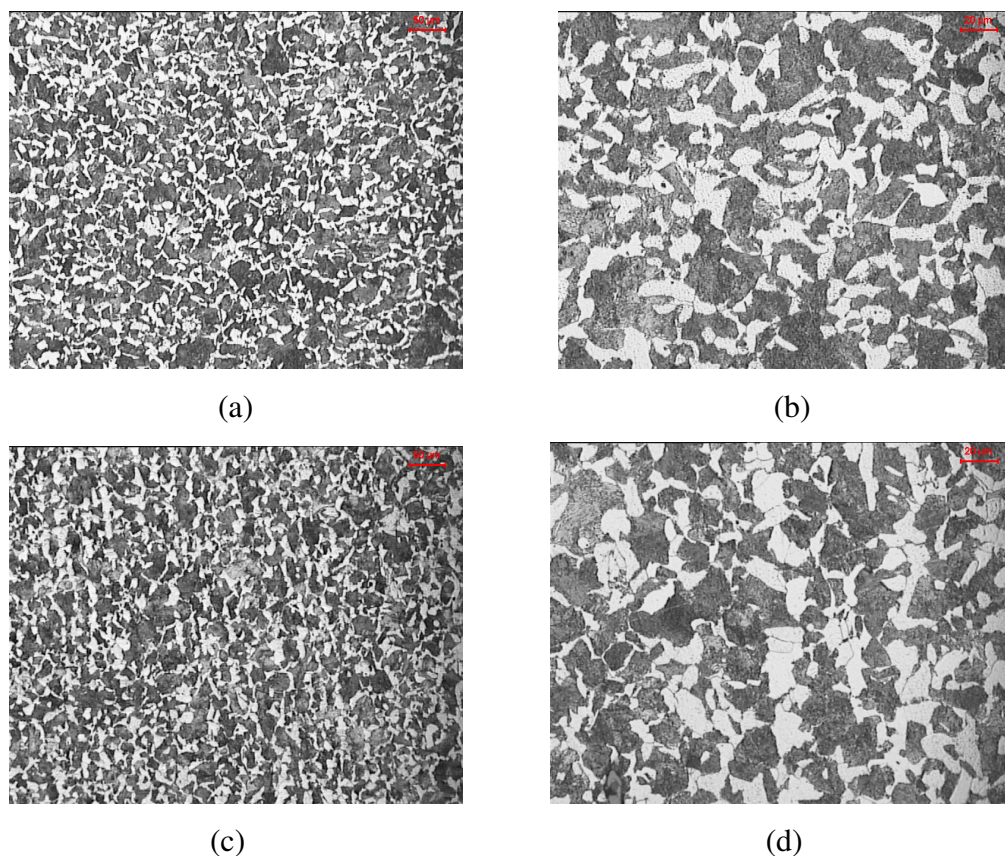


Figura 4.2. (a) e (b) Seções longitudinal e (c) e (d) transversal do aço estudado. Ataque: Nital. Microscopia óptica. Ressaltam-se: perlita (regiões enegrecidas) e ferrita (regiões esbranquiçadas).

4.2. Fração Volumétrica de Perlita

Neste item é apresentada uma análise quantitativa da perlita existente na microestrutura do aço estudado, **tabelas 4.1 e 4.2**. A perlita é bifásica e resulta da transformação eutetóide da austenita, consistindo em camadas alternadas (ou lamelas) de ferrita (α) e cementita (carboneto de ferro – Fe_3C) [24].

Tabela 4.1. Medições da fração volumétrica de perlita.

Ponto	Fração Vol. Perlita (%)
1	58
2	61
3	56
4	62
5	65
6	59
7	63
8	58,5
9	64
10	63
11	60
12	62
13	58
14	64
15	61
16	63,5
17	63
18	59
19	59
20	64,5
Média	61,2
Desv. Pad.	2,6

Tabela 4.2. Média e desvio padrão para a fração volumétrica de perlita.

Fração Volumétrica de Perlita
$(61,2 \pm 2,6)\%$

A amostra para a determinação de fração volumétrica possui 20 elementos e para ela foi obtida a média amostral de 61,2% e o desvio-padrão amostral de 2,6%. Dessa forma, é possível a construção de um intervalo de confiança com 95% de probabilidade do valor real, para a fração volumétrica de perlita, estar contido nele, por meio da equação apresentada no item 3.2.5. com as seguintes entradas: $\bar{x} =$

61,2%, $s = 2,6\%$, $n = 20$ e $t = t_{19;2,5\%}$. Resulta-se, portanto, no seguinte intervalo: $(61,2 \pm 1,2)\%$.

4.3. Tamanho de Grão

Neste item é apresentado um valor médio para o tamanho de grão, **tabelas 4.3** e **4.4**, cuja metodologia para a medição foi descrita no item 3.2.1.5.

Tabela 4.3. Medições do tamanho médio de grão.

Ponto	Tamanho de Grão (μm)
1	12,32
2	11,22
3	11,86
4	12,08
5	11,64
6	12,82
7	12,57
8	11,86
9	11,86
10	12,82
11	11,42
12	11,86
13	12,32
14	11,64
15	12,57
16	12,08
17	11,64
18	12,08
19	11,86
20	13,09
Média	12,1
Desv. Pad.	0,5

Tabela 4.4. Média e desvio padrão para o tamanho médio de grão.

Tamanho de Grão Médio
$(12,1 \pm 0,5) \mu\text{m}$

A amostra para a determinação do tamanho de grão possui 20 elementos e para ela foi obtida a média amostral de $12,1 \mu\text{m}$ e o desvio-padrão amostral de $0,5 \mu\text{m}$. Dessa forma, é possível a construção de um intervalo de confiança com 95% de probabilidade do valor real, para o tamanho de grão, estar contido nele, por meio da equação apresentada no item 3.2.5. com as seguintes entradas: $\bar{x} = 12,1 \mu\text{m}$, $s = 0,5 \mu\text{m}$, $n = 20$ e $t = t_{19;2,5\%}$. Resulta-se, portanto, no seguinte intervalo: **$(12,1 \pm 0,2) \mu\text{m}$** .

4.4. Dureza (HV)

A dureza pode ser considerada como a medida da resistência de um material à deformação pela indentação da sua superfície ou por abrasão [24]. Na **tabela 4.5**, é apresentado o valor da dureza, medida em Vickers, para a seção longitudinal e transversal. A **tabela 4.6** reúne todas as medidas de dureza em uma única amostra a fim de determinar o valor da dureza média geral para o aço em estudo.

Tabela 4.5. Medição da dureza Vickers nas seções longitudinal e transversal.

Longitudinal		Transversal	
Ponto	Dureza (HV)	Ponto	Dureza (HV)
1	189,1	1	179,3
2	183,2	2	186,4
3	185	3	186,2
4	184,9	4	183,4
5	181,8	5	184,4
Média	184,8	Média	183,9
Desv. Pad.	2,7	Desv. Pad.	2,9

Tabela 4.6. Média e desvio padrão para a dureza Vickers da amostra.

Dureza Vickers (HV 30)
$(184,4 \pm 2,7)\text{HV}$

Inicialmente, foi avaliado se a dureza do aço estudado era equivalente para as seções longitudinais e transversais. Com uma significância de 5%, concluiu-se que para todo o aço a dureza pôde ser considerada igual, independentemente da seção onde são feitos os ensaios. Assim, os dados referentes a cada seção foram reunidos em uma mesma amostra, a qual se tornou representativa para todo o aço. Dessa forma, tem-se que a amostra para a determinação da dureza possui 10 elementos e para ela foi obtida a média amostral de 184,4 HV e o desvio-padrão amostral de 2,7 HV. Assim, é possível a construção de um intervalo de confiança com 95% de probabilidade do valor real da dureza estar contido nele, por meio da equação apresentada no item 3.2.5. com as seguintes entradas: $\bar{x} = 184,4 \text{ HV}$, $s = 2,7 \text{ HV}$, $n = 10$ e $t = t_{9;2,5\%}$. Resulta-se, portanto, no seguinte intervalo: **$(184,4 \pm 1,9) \text{ HV}$** .

4.5. Microdureza (HV)

Como apresentada no item 3.2.1.2., a carga neste tipo de ensaio é de apenas 15-20mN o que é de diferença considerável em relação à carga de 30kgf utilizada para o ensaio de dureza, como apresentado no item precedente. Dessa forma, a dureza é analisada em cada microconstituente e nas inclusões separadamente, conferindo, assim, a possibilidade de verificar se os valores de dureza para a inclusão e microconstituíntes são, estatisticamente, diferentes entre si. Vale ressaltar a diferença no número de amostras de microdureza para os próximos três itens. Isso se deve, sobretudo, a dificuldades práticas para encontrar regiões passíveis à medição, assim, para a ferrita, por exemplo, foram determinados 19 pontos enquanto para a inclusão somente 6 pontos foram determinados.

4.5.1. Inclusões de Sulfeto de Manganês (MnS)

Na **tabela 4.7** são apresentados os valores para carga máxima (Pmax), profundidade final da indentação (hf), profundidade máxima (hmax), módulo de elasticidade (E), dureza Vickers (HV), dureza plástica (HP) e dureza universal (HU) para 6 pontos aleatoriamente escolhidos nas inclusões da microestrutura do aço estudado. As inclusões analisadas correspondem a sulfetos de manganês (MnS). As propriedades dessas inclusões são importantes, pois elas estão relacionadas com a usinabilidade dos materiais.

Tabela 4.7. Dados obtidos nas medições da microdureza instrumentada das inclusões de MnS. Onde: carga máxima (Pmax), profundidade final da indentação (hf), profundidade máxima (hmax), módulo de elasticidade (E), dureza Vickers (HV), dureza plástica (HP) e dureza universal (HU).

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	E [GPa]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	19,98	0,46	0,51	207,76	2,16	2,45	2,26
2	19,98	0,47	0,51	239,72	2,10	2,38	2,22
3	19,98	0,47	0,51	231,84	2,10	2,37	2,21
4	19,98	0,44	0,48	224,43	2,33	2,64	2,43
5	19,98	0,47	0,51	225,82	2,14	2,42	2,25
6	19,98	0,45	0,49	227,28	2,31	2,61	2,41
Média	19,98	0,46	0,50	226,14	2,19	2,48	2,30
Desv. Pad.	0,00	0,01	0,01	10,57	0,10	0,12	0,10
Coefvar [%]	0,00	2,84	2,65	4,68	4,76	4,76	4,28

A amostra para a determinação da microdureza Vickers (HV) das inclusões possui 6 elementos e para ela foi obtida a média amostral de 219 HV e o desvio-padrão amostral de 0,10 HV. Dessa forma, é possível a construção de um intervalo de confiança com 95% de probabilidade do valor real, para a fração volumétrica de perlita, estar contido nele, por meio da equação apresentada no item 3.2.5. com as seguintes entradas: $\bar{x} = 219$ HV, $s = 10$ HV, $n = 6$ e $t = t_{5;2,5\%}$. Resulta-se, portanto, no seguinte intervalo: **(219 ± 10)HV**.

4.5.2. Ferrita

Na **tabela 4.8** são apresentados os valores para carga máxima (Pmax), profundidade da indentação (hf), profundidade máxima (hmax), módulo de elasticidade (E), dureza Vickers (HV), dureza plástica (HP) e dureza universal (HU) para 19 pontos aleatoriamente escolhidos nas regiões ferríticas da microestrutura do aço estudado.

A amostra para a determinação da microdureza Vickers (HV) da ferrita possui 19 elementos e para ela foi obtida a média amostral de 202 HV e o desvio-padrão amostral de 16 HV. Dessa forma, é possível a construção de um intervalo de confiança com 95% de probabilidade do valor real, para a fração volumétrica de perlita, estar contido nele, por meio da equação apresentada no item 3.2.5. com as seguintes entradas: $\bar{x} = 202 \text{ HV}$, $s = 16 \text{ HV}$, $n = 19$ e $t = t_{18;2,5\%}$. Resulta-se, portanto, no seguinte intervalo: **(202 ± 8)HV**.

Tabela 4.8. Dados obtidos nas medições da microdureza instrumentada da ferrita. Onde: carga máxima (Pmax), profundidade final da indentação (hf), profundidade máxima (hmax), módulo de elasticidade (E), dureza Vickers (HV), dureza plástica (HP) e dureza universal (HU).

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	E [GPa]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	14,98	0,44	0,47	210,97	1,79	2,03	1,90
2	14,98	0,42	0,45	235,07	1,92	2,18	2,04
3	14,98	0,37	0,41	254,39	2,25	2,55	2,37
4	14,98	0,45	0,48	202,09	1,73	1,96	1,83
5	14,98	0,39	0,43	239,48	2,11	2,39	2,23
6	14,98	0,39	0,43	254,50	2,08	2,35	2,21
7	14,98	0,41	0,44	217,26	2,01	2,27	2,11
8	14,98	0,40	0,43	232,37	2,06	2,32	2,17
9	14,98	0,37	0,41	227,91	2,27	2,57	2,37
10	14,98	0,41	0,44	235,09	1,99	2,25	2,11
11	14,98	0,38	0,41	241,04	2,22	2,51	2,33
12	14,98	0,41	0,45	242,62	1,96	2,21	2,08
13	14,98	0,38	0,42	237,74	2,17	2,46	2,29
14	14,98	0,40	0,43	240,24	2,07	2,34	2,18
15	14,98	0,38	0,42	225,73	2,15	2,44	2,26
16	14,98	0,41	0,44	224,38	1,98	2,24	2,09
17	14,98	0,42	0,46	222,02	1,90	2,14	2,01
18	14,98	0,41	0,44	235,93	2,02	2,29	2,14
19	14,98	0,45	0,49	222,75	1,71	1,93	1,82
Média	14,98	0,40	0,44	231,66	2,02	2,29	2,13
Desv. Pad.	0,00	0,02	0,02	13,43	0,16	0,18	0,16
Coefvar [%]	0,00	5,59	5,11	5,80	8,07	8,07	7,70

4.5.3. Perlita

Na **tabela 4.9** são apresentados os valores para carga máxima (Pmax), profundidade da indentação (hf), profundidade máxima (hmax), módulo de elasticidade (E), dureza Vickers (HV), dureza plástica (HP) e dureza universal (HU) para 11 pontos aleatoriamente escolhidos nas regiões perlíticas da microestrutura do aço estudado.

Tabela 4.9. Dados obtidos nas medições da microdureza instrumentada da perlita. Onde: carga máxima (Pmax), profundidade final da indentação (hf), profundidade máxima (hmax), módulo de elasticidade (E), dureza Vickers (HV), dureza plástica (HP) e dureza universal (HU).

no.	Pmax [mN]	hf [um]	hmax [um]	E [GPa]	HV [GPa]	HP [GPa]	HU [GPa]
1	49,99	0,71	0,79	192,68	2,66	3,01	2,72
2	49,99	0,74	0,83	180,49	2,48	2,81	2,54
3	49,99	0,77	0,85	188,41	2,34	2,65	2,42
4	49,99	0,71	0,80	183,86	2,63	2,98	2,68
5	49,99	0,78	0,86	194,43	2,31	2,61	2,39
6	49,99	0,71	0,79	196,59	2,66	3,01	2,72
7	49,99	0,78	0,86	183,65	2,31	2,61	2,38
8	49,99	0,74	0,81	209,77	2,52	2,85	2,60
9	49,99	0,73	0,79	236,91	2,62	2,96	2,72
Média	49,99	0,74	0,82	196,31	2,50	2,83	2,57
Desv. Pad.	0,00	0,03	0,03	17,59	0,15	0,17	0,15
Coefvar [%]	0,00	3,81	3,41	8,96	6,05	6,05	5,72

A amostra para a determinação da microdureza Vickers (HV) da perlita possui 9 elementos e para ela foi obtida a média amostral de 250 HV e o desvio-padrão amostral de 15 HV. Dessa forma, é possível a construção de um intervalo de confiança com 95% de probabilidade do valor real, para a fração volumétrica de perlita, estar contido nele, por meio da equação apresentada no item 3.2.5. com as

seguintes entradas: $\bar{x} = 250$ HV, $s = 15$ HV, $n = 9$ e $t = t_{8;2,5\%}$. Resulta-se, portanto, no seguinte intervalo: **(250 $\pm$ 12)HV**.

4.6. Ensaio de Usinagem

Os resultados de forças de corte e avanço obtidos são apresentados na **tabela 4.10**, na qual há dois parâmetros adicionais: profundidade de corte (a_p) e pressão de corte experimental (K_{se}), cuja média e desvio padrão encontram-se na **tabela 4.11**. Cabe ressaltar que os resultados dos ensaios da pressão de corte experimental (K_{se}) apresentaram grandes variações dentro das mesmas condições, implicando, por conseguinte, um desvio padrão grande, o mesmo ocorreu para a força de avanço corrigida (em menor escala). Embora se tenha utilizado parâmetros que visam corrigir essas diferenças (análise feita com K_{se} e não com força de corte e análise feita com força de avanço corrigida e não com a força de avanço), a diferença na profundidade de corte causa um aumento no esforço de usinagem além das possibilidades de correção dos parâmetros K_{se} e F_a (corrigida). A profundidade de corte representa a profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano trabalho [12]. A pressão de corte experimental é um parâmetro adotado no trabalho para permitir uma interpretação mais coerente em relação à força de corte e seu conceito está intimamente ligado ao da pressão de corte específica, que é um parâmetro muito útil na avaliação da usinabilidade, sendo até mais representativo que a própria força de corte, pois é um valor obtido da relação das forças de corte medidas e de parâmetros de usinagem. Para o trabalho adotou-se a seguinte relação para a pressão de corte experimental:

$$K_{se} = \frac{F_c}{f \cdot a_p}, \text{ onde } F_c \text{ é a força de corte, } f \text{ é o avanço e } a_p \text{ é a profundidade de corte.}$$

Tabela 4.10. Ensaios de usinagem. Onde: profundidade de corte (a_p), força de corte (F_c), força de avanço (F_a), pressão de corte experimental (K_{se}) e força de avanço corrigida ($F_{a-corrigida}$).

Ensaio	a_p (mm)	F_c (N)	F_a (N)	K_{se} (N/mm ²)	F_a (N) (corrigida)
Vc=10/min (ferramenta não recoberta)					
1	0,35	75,6±5,2	22,2±3,1	4320	25,4±3,1
2	0,4	78,9±6,0	29,8±3,3	3945	29,8±3,3
3	0,4	79,6±5,5	31,0±3,1	3980	31,0±3,1
Vc=10/min (ferramenta recoberta)					
1	0,35	87,9±6,6	34,7±4,3	5023	39,7±4,3
2	0,4	79,7±6,3	30,5±3,4	3985	30,5±3,4
3	0,35	81,4±7,3	30,5±4,3	4651	34,9±4,3
Vc=10/min (ferramenta comercial)					
1	0,35	78,4±5,7	22,7±2,6	4480	25,9
2	0,35	93,8±6,0	26,7±2,6	5360	30,5
3	0,35	95,1±7,4	25,8±2,2	5434	29,5
Vc=100/min (ferramenta não recoberta)					
1	0,35	97,7±4,1	63,5±2,4	5583	72,6
2	0,35	75,3±3,2	33,9±3,2	4303	38,7
3	0,35	79,3±4,9	37,1±2,6	4531	42,4
Vc=100/min (ferramenta recoberta)					
1	0,35	98,2±6,3	56,9±5,4	5611	65,0±5,4
2	0,25	80,9±17,1	42,3±10,1	6472	67,7±10,1
3	0,35	77,8±15,7	40,6±8,6	4446	46,4±8,6
Vc=100/min (ferramenta comercial)					
1	0,35	65,1±12,4	17,2±3,4	3720	19,7±3,4
2	0,3	65,9±12,1	19,1±3,7	4393	25,5±3,7
3	0,35	65,7±16,4	19,5±5,5	3754	22,3±5,5
Vc=300/min (ferramenta não recoberta)					
1	0,4	96,4±28,0	50,2±14,3	4820	50,2±14,3
2	0,4	92,1±23,6	45,4±12,2	4605	45,4±12,2
3	0,4	89,8±24,8	45,2±12,8	4490	45,2±12,8
Vc=300/min (ferramenta recoberta)					
1	0,4	99,3±27,8	49,3±13,3	4965	49,3±13,3
2	0,4	103,1±22,9	55,0±19,4	5155	55,0±19,4
3	0,4	82,8±21,8	50,9±14,8	4140	50,9±14,8
Vc=300/min (ferramenta comercial)					
1	0,4	90,9±27,7	34,9±11,2	4545	34,9±11,2
2	0,4	99,1±33,4	35,3±10,7	4955	35,3±10,7
3	0,4	77,7±20,2	28,7±8,5	3885	28,7±8,5

Tabela 4.11. Média e desvio padrão para as condições em estudo.

Condição	Fa (N) (corrigida)	Kse (N/mm2)
Vc=10/min (ferramenta não recoberta)	28,7±5,5	4082±202
Vc=10/min (ferramenta recoberta)	35,0±7,0	4553±526
Vc=10/min (ferramenta comercial)	28,6±4,3	5091±531
Vc=100/min (ferramenta não recoberta)	51,2±4,8	4806±683
Vc=100/min (ferramenta recoberta)	59,7±11,6	5510±1017
Vc=100/min (ferramenta comercial)	22,5±2,9	3956±379
Vc=300/min (ferramenta não recoberta)	46,9±2,8	4638±168
Vc=300/min (ferramenta recoberta)	51,7±2,9	4753±540
Vc=300/min (ferramenta comercial)	33,0±3,7	4462±540

Os resultados anteriores são apresentados a seguir em gráficos a fim de permitir uma melhor visualização e interpretação da variação dos parâmetros ensaiados para as diversas condições de estudo. Na **figura 4.3**, encontra-se a variação da força de avanço corrigida em função das velocidades de corte estudadas para as três condições da ferramenta. Na **figura 4.4**, encontra-se a variação da pressão de corte experimental (Kse) em função das velocidades de corte estudadas para as três condições da ferramenta. As **figuras 4.5 e 4.6** apresentam, respectivamente, a variação da força de avanço corrigida e da pressão de corte experimental (Kse) em função das condições da ferramenta para as três velocidades de corte.

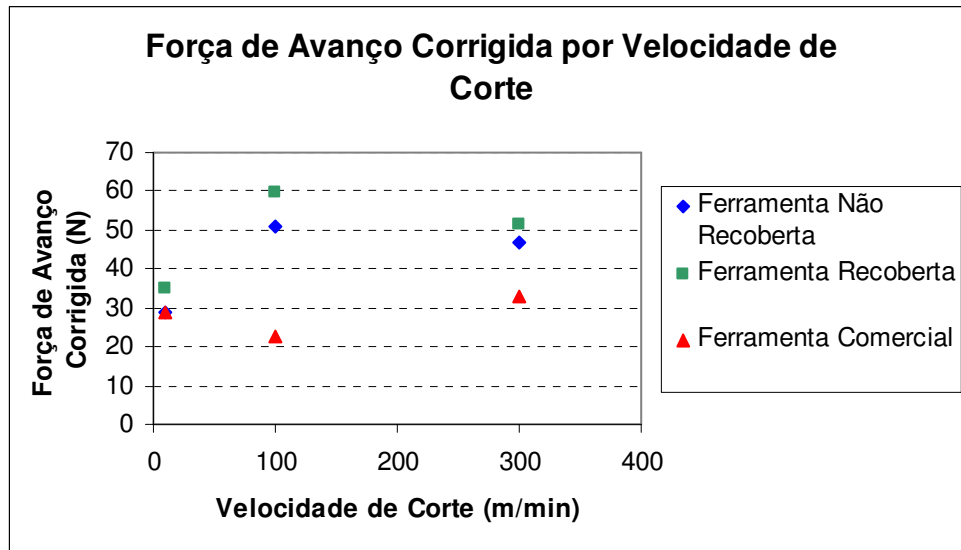


Figura 4.3. Força de avanço corrigida em função da velocidade de corte para cada condição de ferramenta.

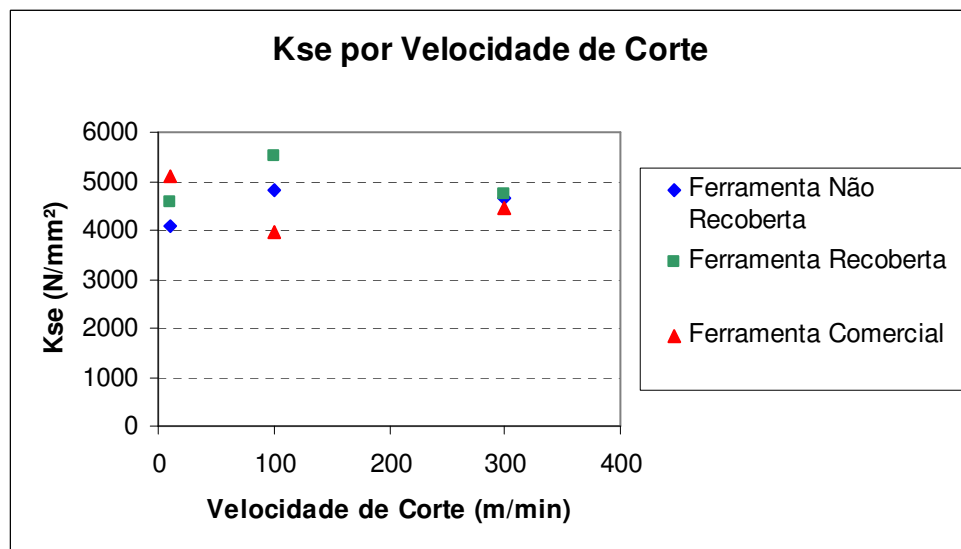


Figura 4.4. Pressão de corte experimental (Kse) em função da velocidade de corte para cada condição de ferramenta.

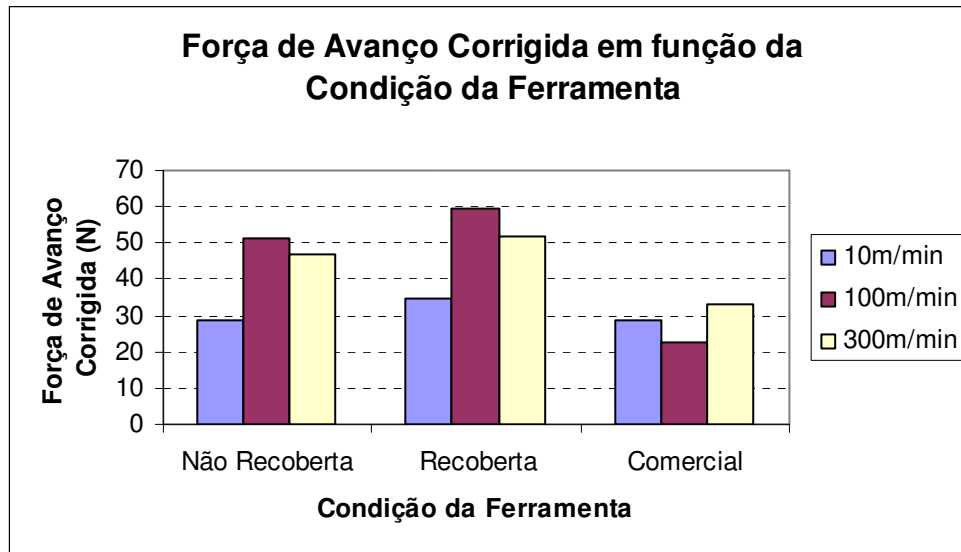


Figura 4.5. Força de avanço corrigida em função da condição da ferramenta para cada velocidade de corte.

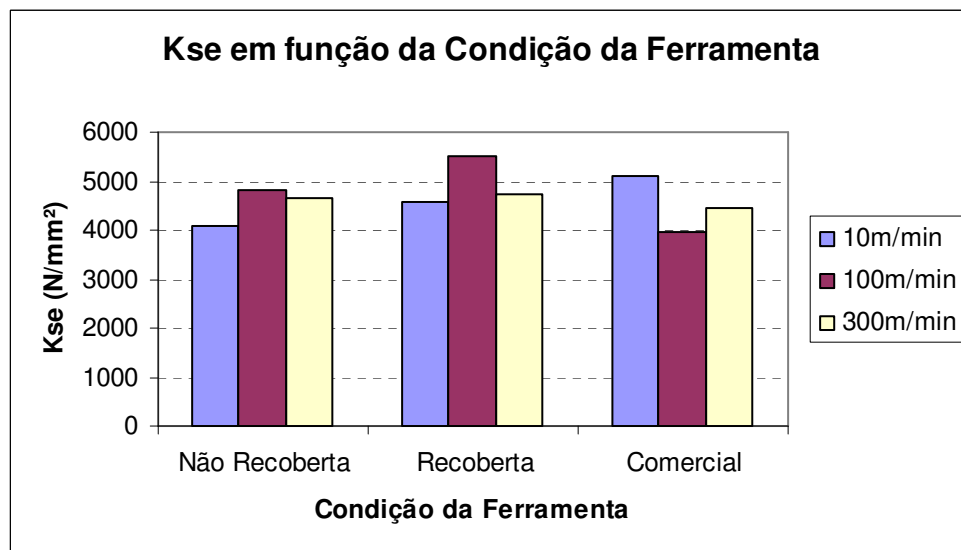


Figura 4.6. Pressão de corte experimental (Kse) em função da condição da ferramenta para cada velocidade de corte.

4.7. Rugosidade

Os valores de rugosidade medidos correspondem ao R_a (rugosidade média), R_t (rugosidade total) e R_p (rugosidade máxima). A rugosidade média é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média em um comprimento de amostragem, a rugosidade total corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento total de avaliação, independentemente dos valores de rugosidade máxima parciais, definidos em cada comprimento de amostragem e, por fim, a rugosidade máxima é definida como o maior valor do conjunto das rugosidades máximas, cada qual associada a um dos comprimentos de amostragem que compõem o comprimento total de avaliação. Os resultados dos três tipos de rugosidade são apresentados na **tabela 4.12** para todas as condições ensaiadas, cuja média e desvio padrão encontram-se na **tabela 4.13**.

Tabela 4.12. Resultados para Ra (rugosidade média), Rt (rugosidade total) e Rp (rugosidade máxima), para as condições estudadas.

Ensaio	Ra [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]
Vc=10/min (ferramenta não recoberta)			
1	2,12	13,87	5,74
2	2,15	16,81	5,92
3	1,88	15,01	4,85
Vc=10/min (ferramenta recoberta)			
1	1,49	12,96	4,51
2	2,09	17,00	5,94
3	2,03	14,37	4,92
Vc=10/min (ferramenta comercial)			
1	2,96	19,82	7,50
2	3,99	25,66	11,73
3	3,82	24,54	9,73
Vc=100/min (ferramenta não recoberta)			
1	1,71	12,27	4,85
2	2,56	19,44	6,27
3	2,23	15,16	5,59
Vc=100/min (ferramenta recoberta)			
1	2,15	16,59	6,15
2	2,18	16,62	6,19
3	2,37	18,31	6,74
Vc=100/min (ferramenta comercial)			
1	3,41	23,66	8,96
2	3,19	21,88	8,64
3	3,60	25,98	8,96
Vc=300/min (ferramenta não recoberta)			
1	2,58	14,68	6,87
2	2,92	16,37	7,15
3	2,68	15,70	6,92
Vc=300/min (ferramenta recoberta)			
1	3,72	14,46	8,30
2	2,99	13,38	8,05
3	2,93	11,75	8,11
Vc=300/min (ferramenta comercial)			
1	2,00	12,42	5,56
2	1,57	11,70	3,48
3	2,27	13,47	6,40

Tabela 4.13. Média e desvio padrão para as condições em estudo.

Condição	Ra [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]
Vc=10/min (ferramenta não recoberta)	2,05 $\pm$ 0,15	15,23 $\pm$ 1,48	5,50 $\pm$ 0,57
Vc=10/min (ferramenta recoberta)	1,87 $\pm$ 0,33	14,78 $\pm$ 2,05	5,12 $\pm$ 0,74
Vc=10/min (ferramenta comercial)	3,59 $\pm$ 0,55	23,34 $\pm$ 3,10	9,65 $\pm$ 2,12
Vc=100/min (ferramenta não recoberta)	2,17 $\pm$ 0,43	15,62 $\pm$ 3,61	5,57 $\pm$ 0,71
Vc=100/min (ferramenta recoberta)	2,23 $\pm$ 0,12	17,17 $\pm$ 0,98	6,36 $\pm$ 0,33
Vc=100/min (ferramenta comercial)	3,40 $\pm$ 0,21	23,84 $\pm$ 2,06	8,85 $\pm$ 0,18
Vc=300/min (ferramenta não recoberta)	2,73 $\pm$ 0,17	15,58 $\pm$ 0,85	6,98 $\pm$ 0,15
Vc=300/min (ferramenta recoberta)	3,21 $\pm$ 0,44	13,20 $\pm$ 1,36	8,15 $\pm$ 0,13
Vc=300/min (ferramenta comercial)	1,95 $\pm$ 0,35	12,53 $\pm$ 0,89	5,15 $\pm$ 1,50

Os resultados anteriores são apresentados a seguir graficamente a fim de permitir uma melhor visualização e interpretação da variação dos parâmetros ensaiados para as diversas condições de estudo. Nas **figuras 4.7, 4.8 e 4.9**, encontram-se a variação das rugosidades Ra, Rt e Rp, respectivamente, em função das velocidades de corte estudadas para as três condições da ferramenta. As **figuras 4.10, 4.11 e 4.12** apresentam, a variação das rugosidades Ra, Rt e Rp, respectivamente, em função das condições da ferramenta para as três velocidades de corte.

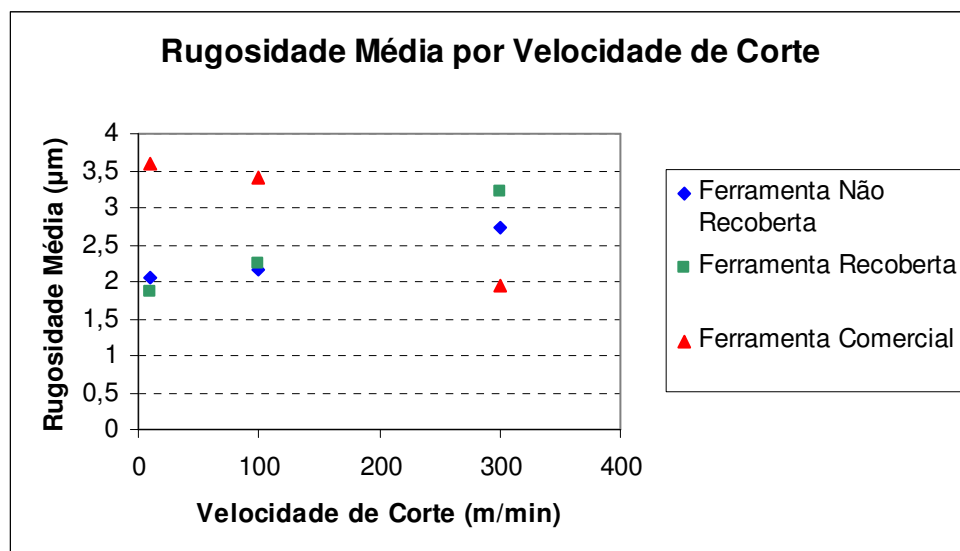


Figura 4.7. Rugosidade média (Ra) em função da velocidade de corte para cada condição de ferramenta.

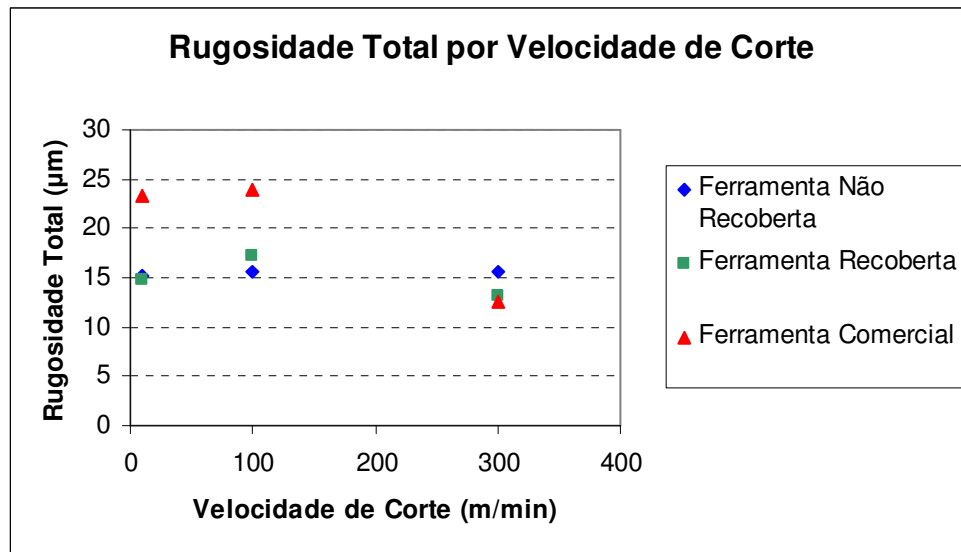


Figura 4.8. Rugosidade total (R_t) em função da velocidade de corte para cada condição de ferramenta.

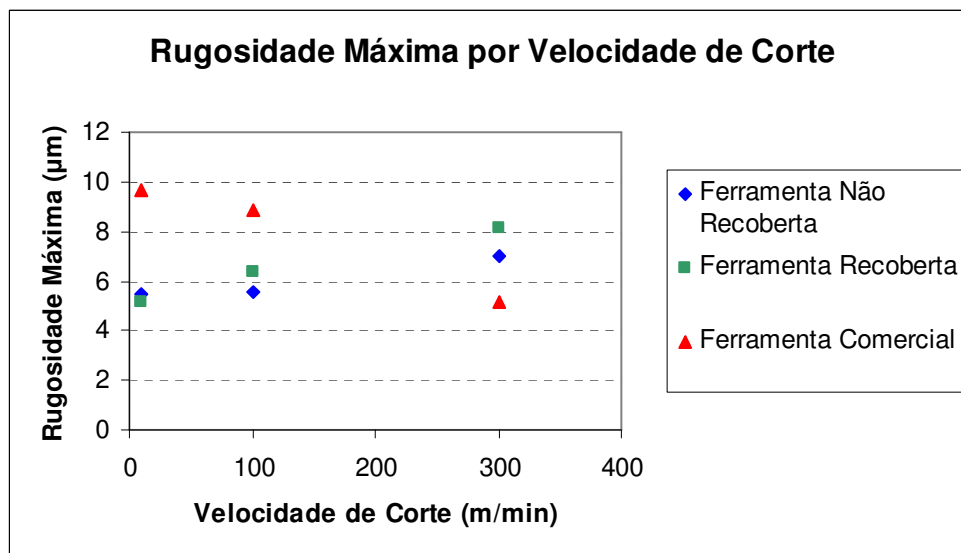


Figura 4.9. Rugosidade máxima (R_p) em função da velocidade de corte para cada condição de ferramenta.

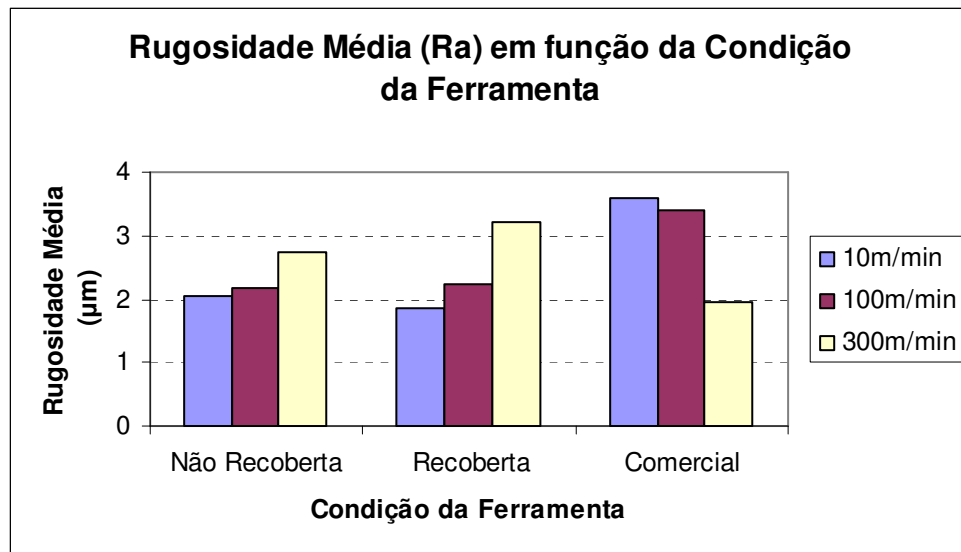


Figura 4.10. Rugosidade média (Ra) em função da condição da ferramenta para cada velocidade de corte.

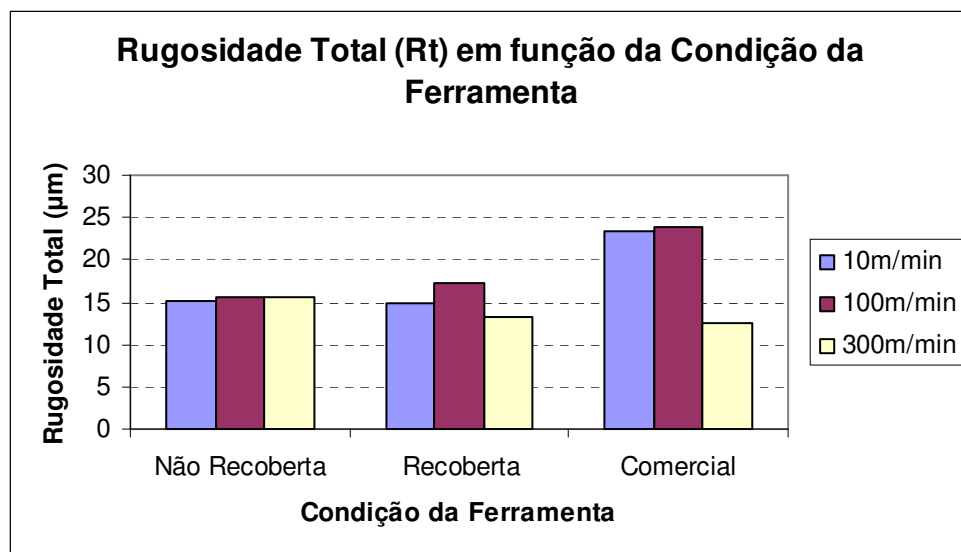


Figura 4.11. Rugosidade total (Rt) em função da condição da ferramenta para cada velocidade de corte.

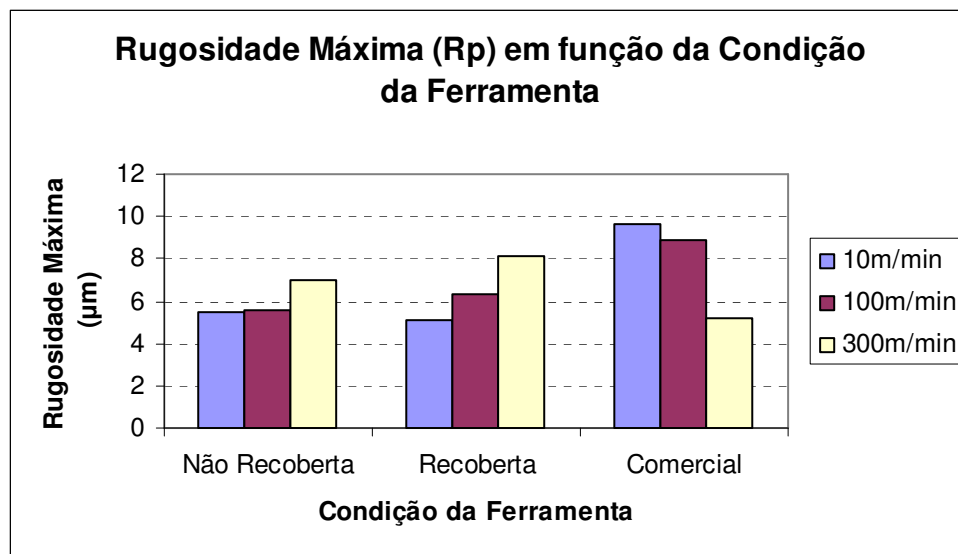


Figura 4.12. Rugosidade máxima (Rp) em função da condição da ferramenta para cada velocidade de corte.

4.8. Desgaste de Ferramenta

A seguir, são apresentadas imagens, obtidas utilizando microscopia óptica, da ponta das ferramentas utilizadas na usinagem do aço estudado sob as 9 condições de ensaio. As **figuras 4.13, 4.14 e 4.15** mostram a superfície da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta não recoberta; as **figuras 4.16, 4.17 e 4.18** mostram as pontas da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta recoberta; as **figuras 4.19, 4.20 e 4.21** mostram as pontas da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta comercial; as **figuras 4.22, 4.23 e 4.24** mostram as pontas da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta não recoberta; as **figuras 4.25, 4.26 e 4.27** mostram as pontas da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta recoberta; as **figuras 4.28, 4.29 e 4.30** mostram as pontas da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta comercial; as **figuras 4.31, 4.32 e 4.33** mostram as pontas da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta não recoberta; as **figuras 4.34, 4.35 e 4.36** mostram as pontas da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta recoberta e, por fim, as **figuras 4.37, 4.38 e 4.39** mostram as pontas da ferramenta para a condição de

velocidade de 300m/min e ferramenta comercial. Para uma melhor visualização dos efeitos sobre as ferramentas, foi também utilizada microscopia eletrônica de varredura (MEV) para as pontas de cada condições de ensaio, onde os efeitos do desgaste foram os mais severos. A **figura 4.13 c, d** apresenta a ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta não recoberta, a **figura 4.16 c, d** apresenta a ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta recoberta, a **figura 4.20 c, d** apresenta a ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta comercial, a **figura 4.22 c, d** apresenta a ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta não recoberta, a **figura 4.26 c, d** apresenta a ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta recoberta, a **figura 4.28 c, d** apresenta a ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta comercial, a **figura 4.31 c, d** apresenta a ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta não recoberta, a **figura 4.35 c, d** apresenta a ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta recoberta e, por fim, a **figura 4.38 c, d** apresenta a ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta comercial.

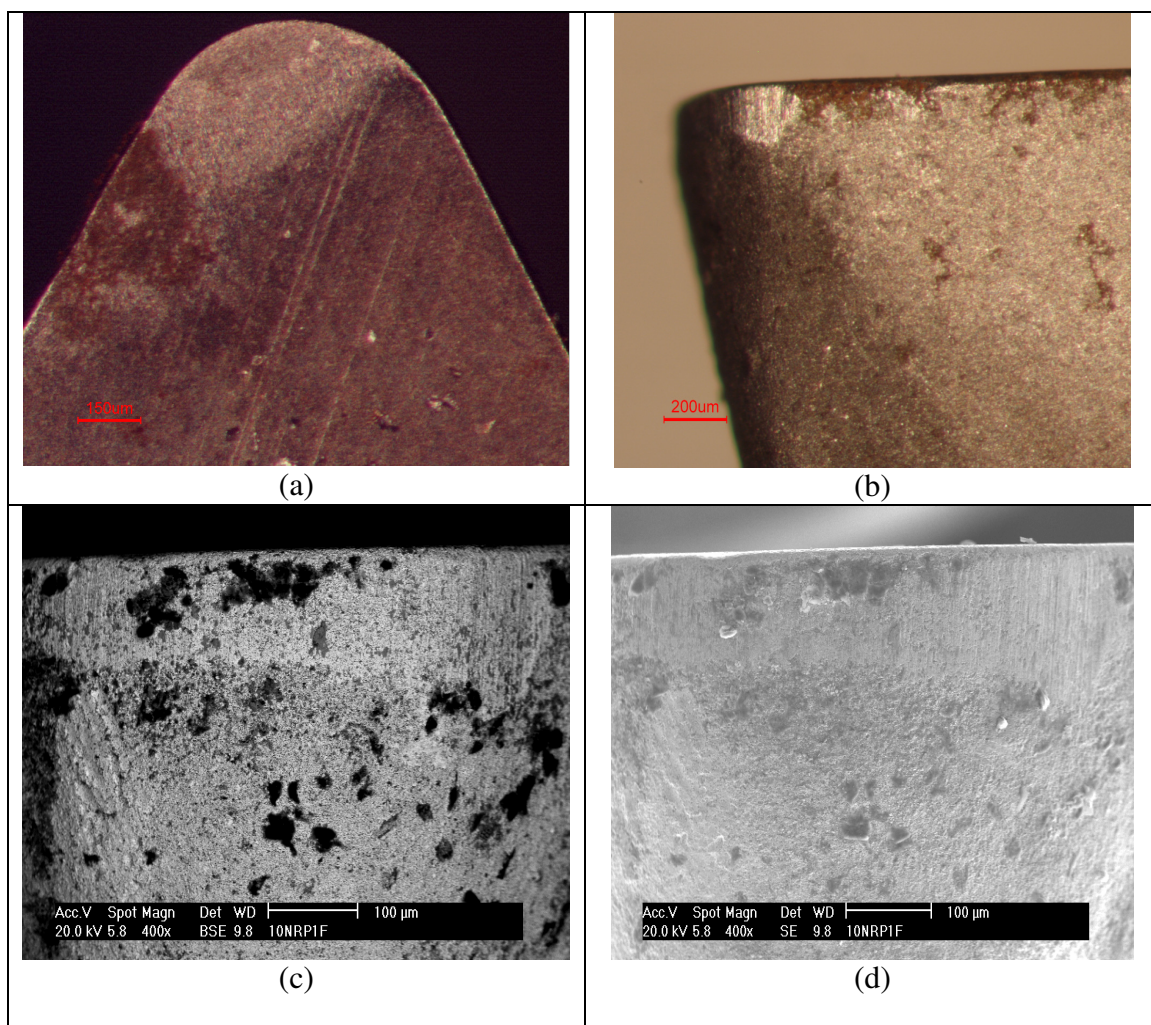


Figura 4.13. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta não recoberta (1° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica. (c) e (d) vista em perfil. MEV.

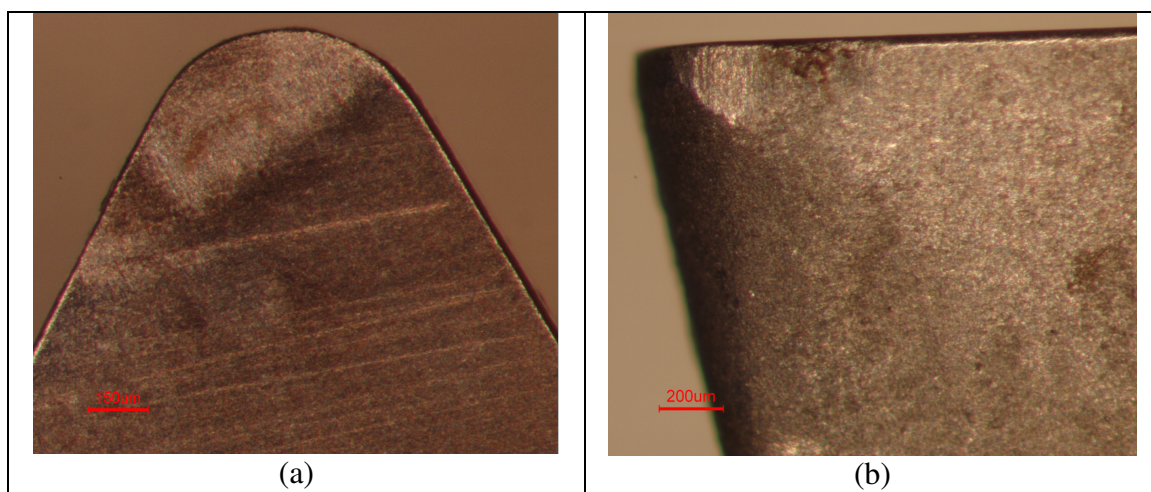


Figura 4.14. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta não recoberta (2° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

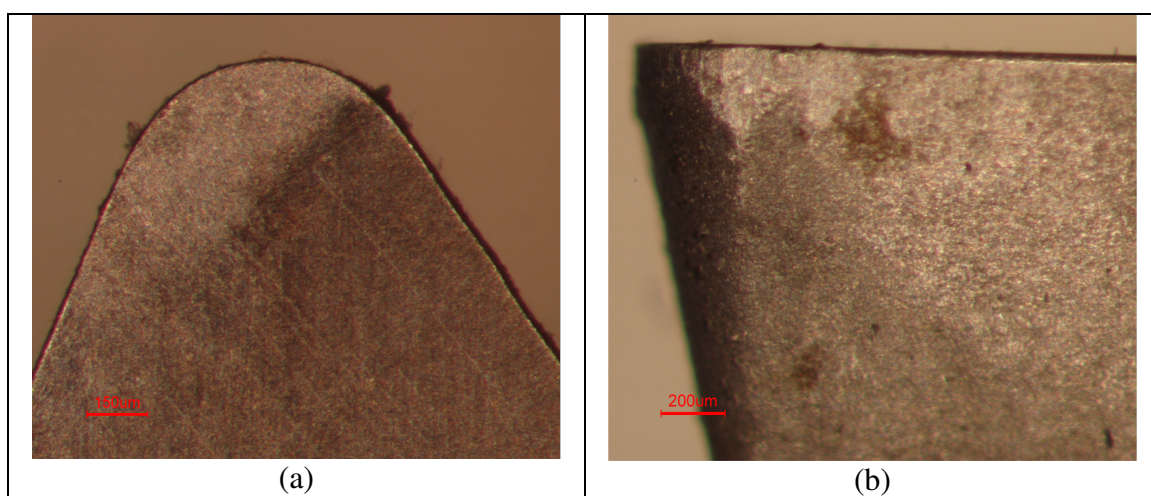


Figura 4.15. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta não recoberta (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

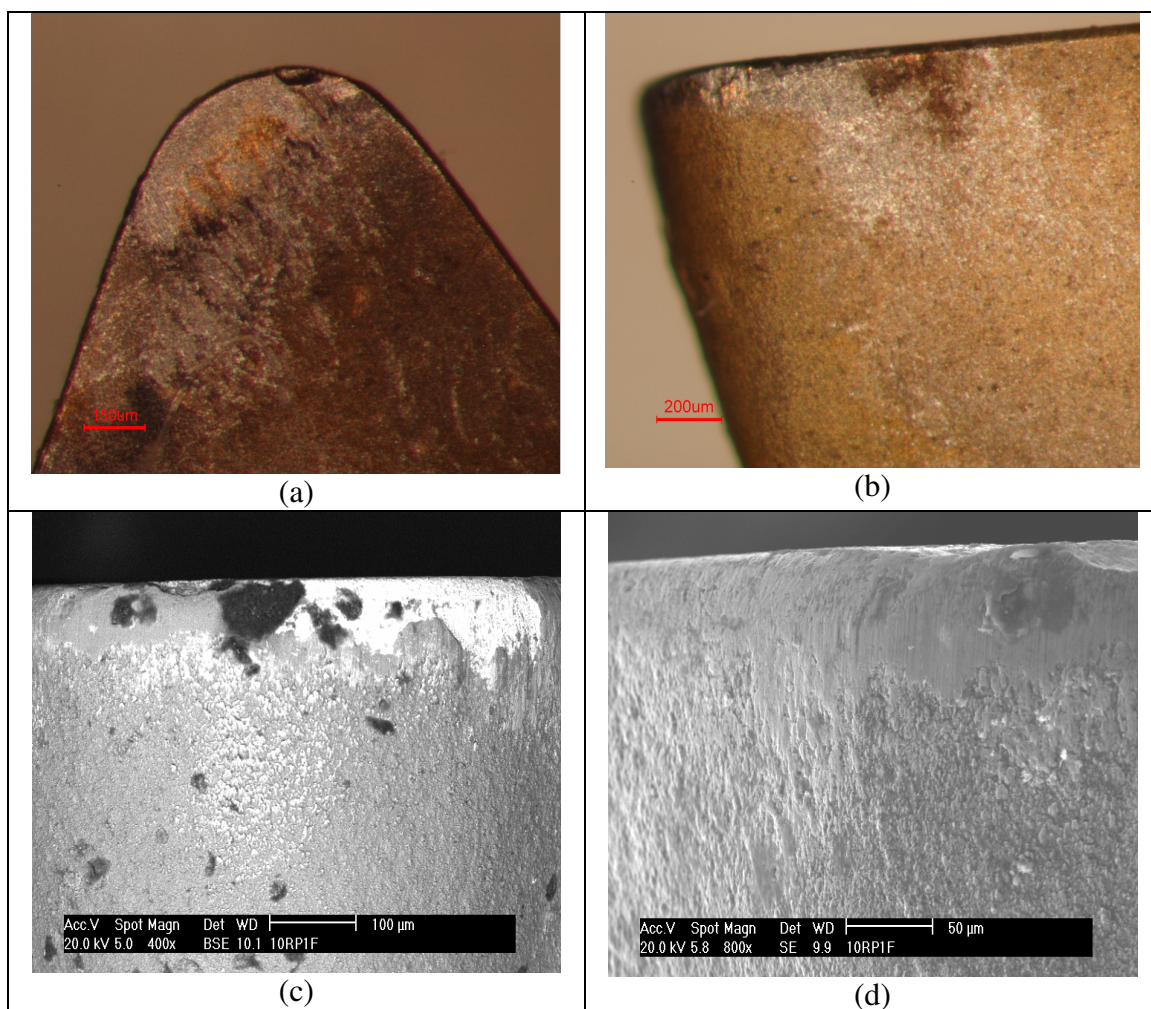


Figura 4.16. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta recoberta (1º ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica. (c) e (d) vista em perfil. MEV.

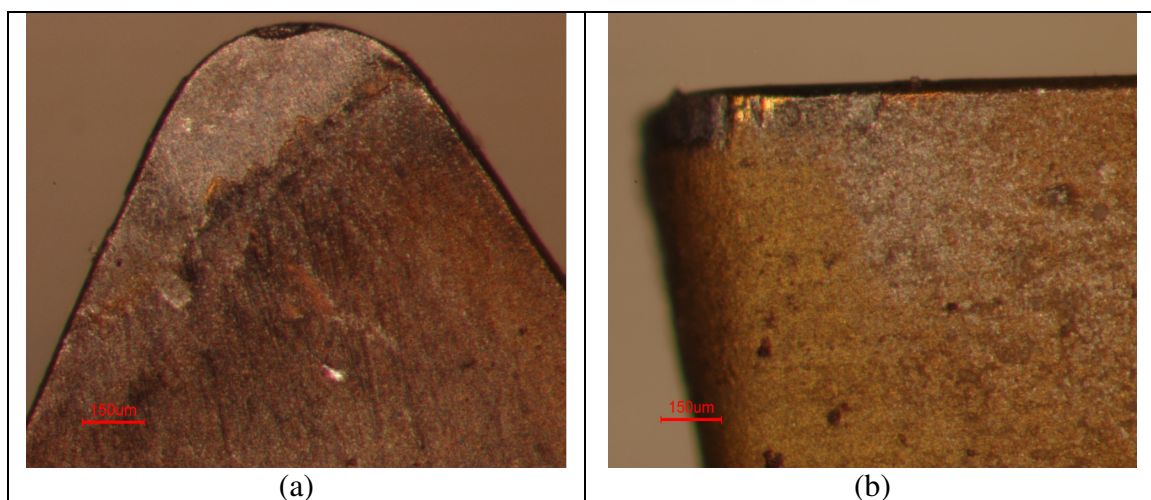


Figura 4.17. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta recoberta (2° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

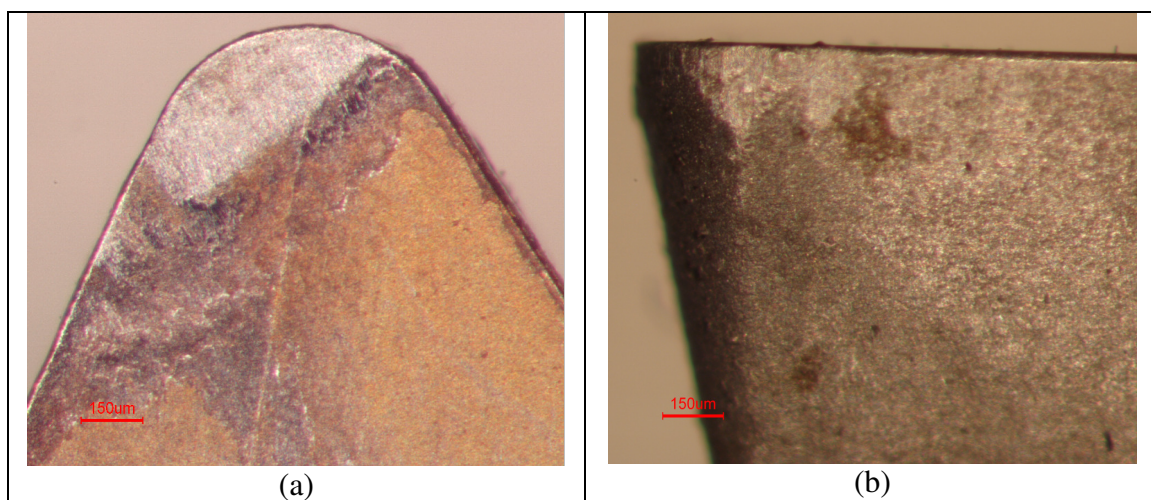


Figura 4.18. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta recoberta (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

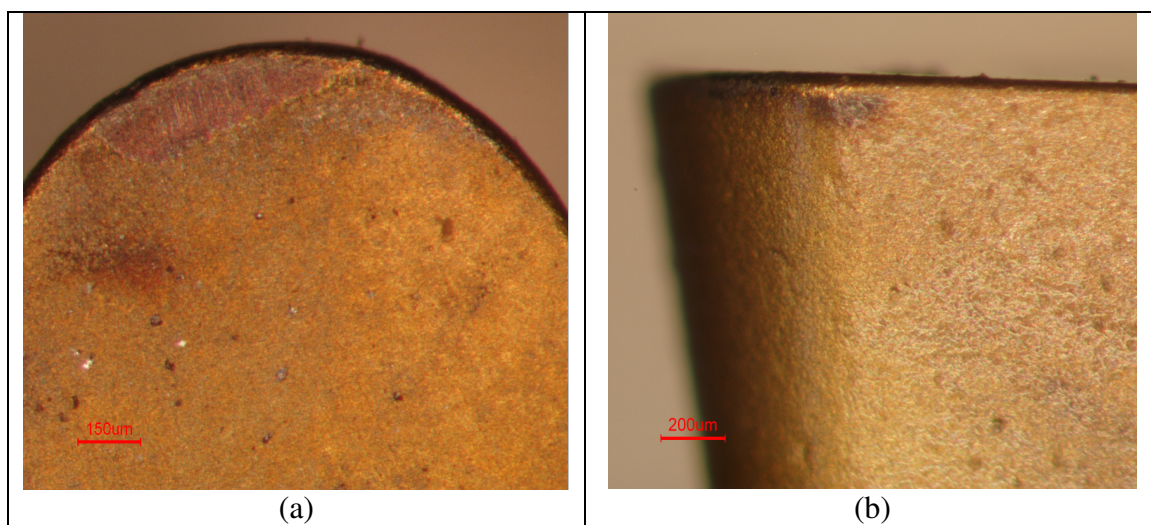


Figura 4.19. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta comercial (1º ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

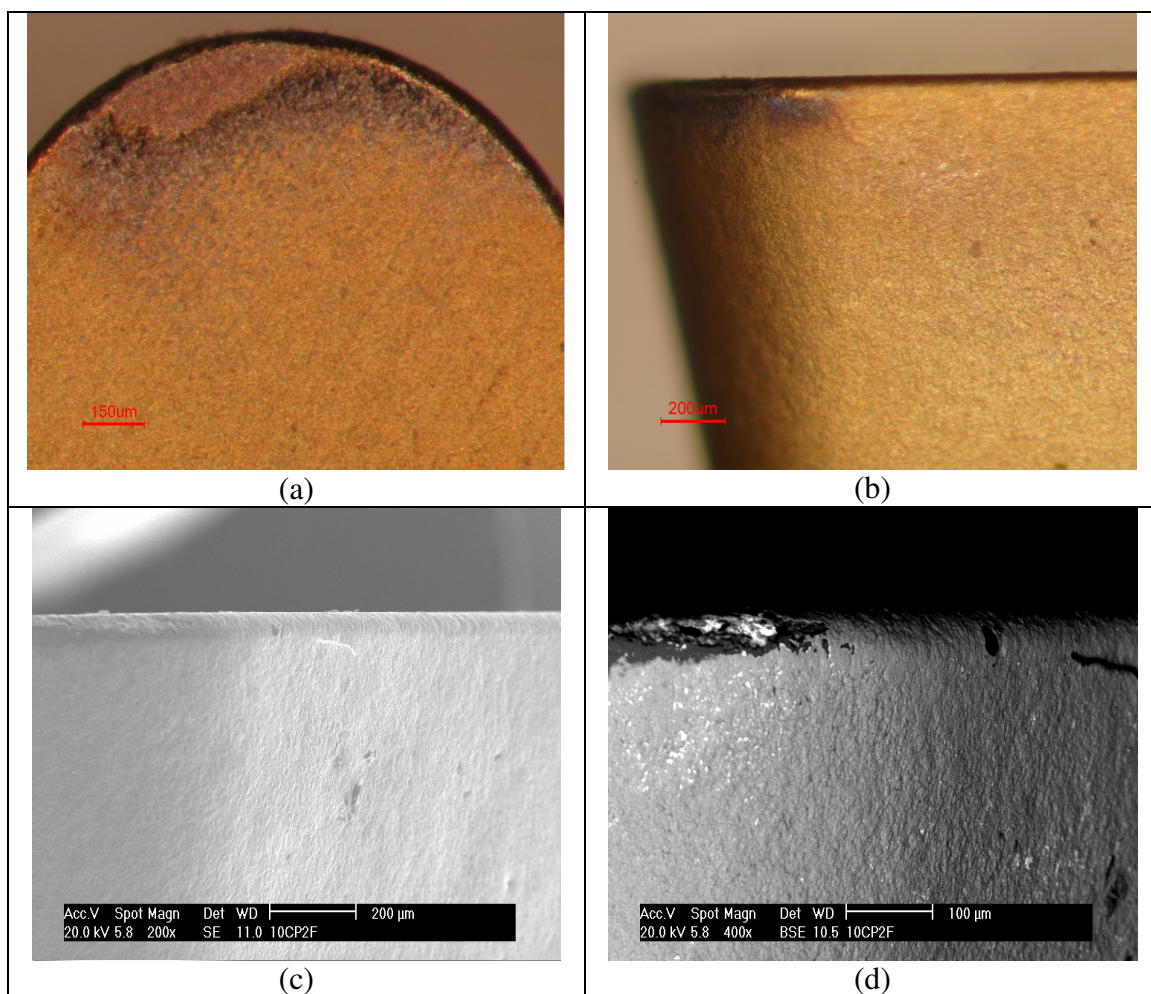


Figura 4.20. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta comercial (2º ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica. (c) e (d) vista em perfil. MEV.

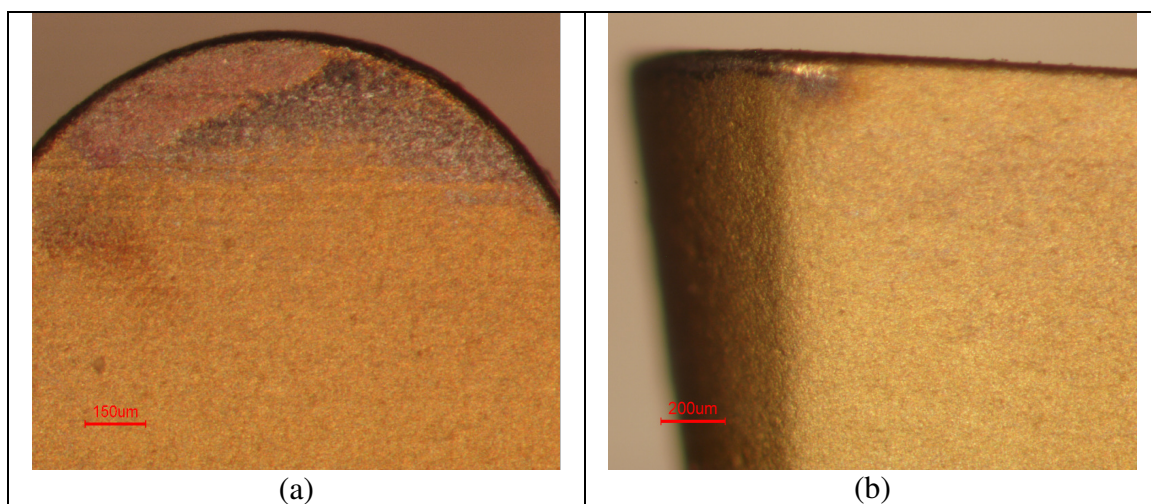


Figura 4.21. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 10m/min e ferramenta comercial (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

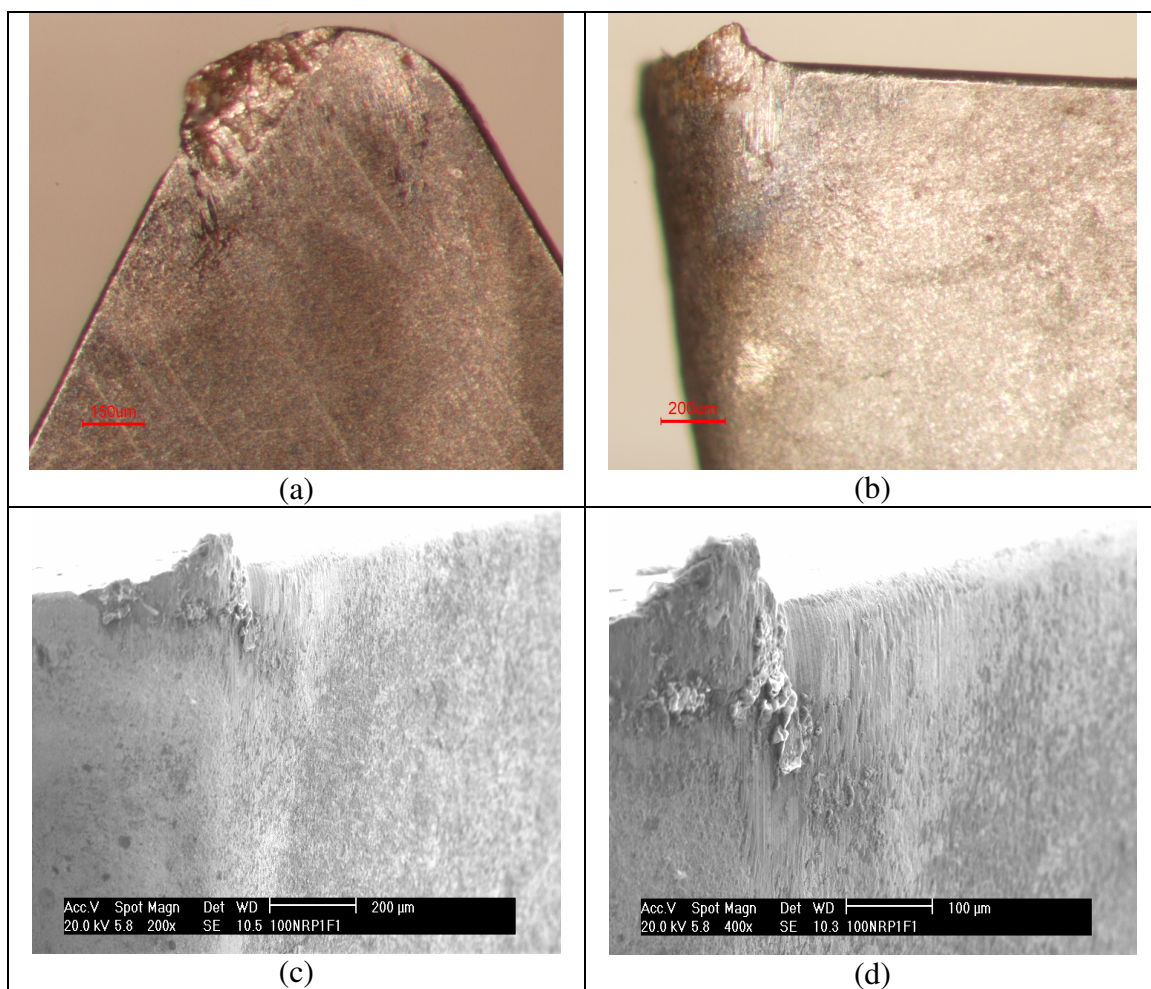


Figura 4.22. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta não recoberta (1° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica. (c) e (d) vista em perfil. MEV.

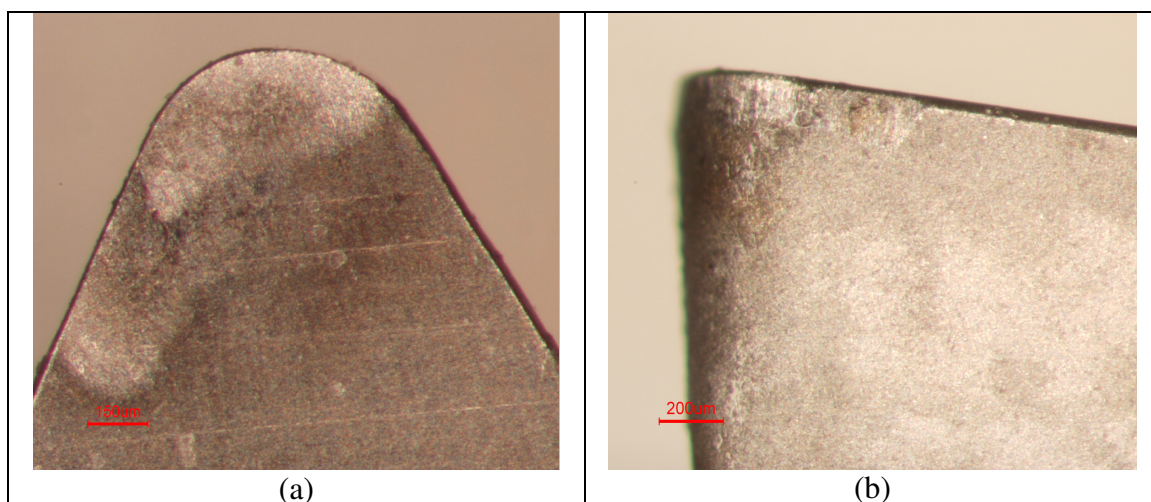


Figura 4.23. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta não recoberta (2° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

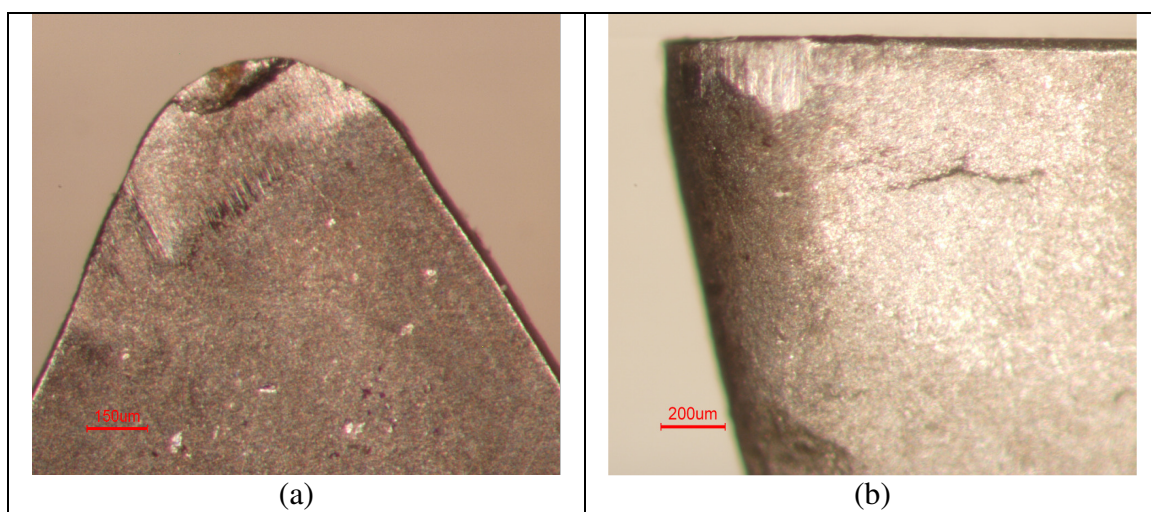


Figura 4.24. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta não recoberta (3° ensaio). (a) vista superior (b) vista em perfil. . Microscopia Óptica.

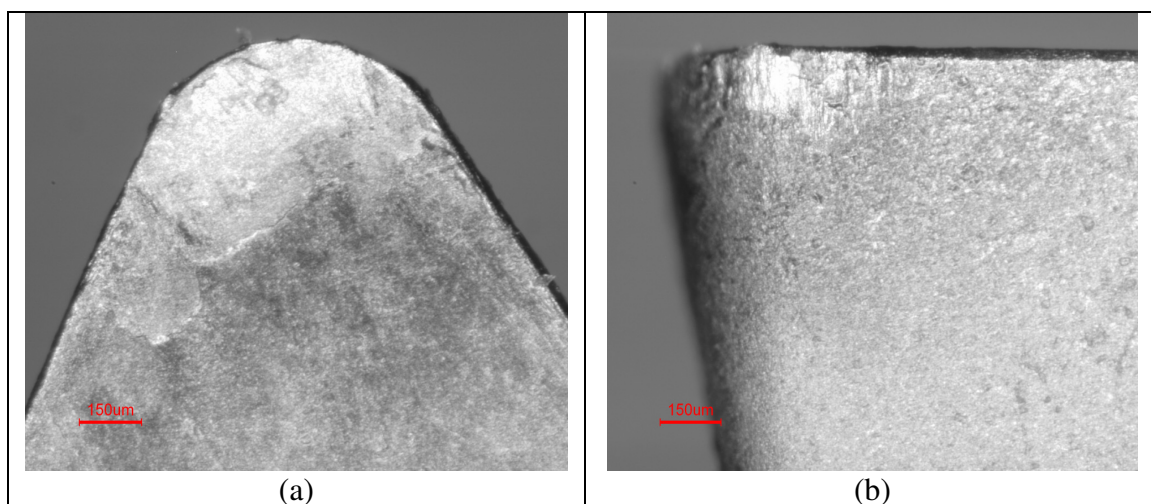


Figura 4.25. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta recoberta (1° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

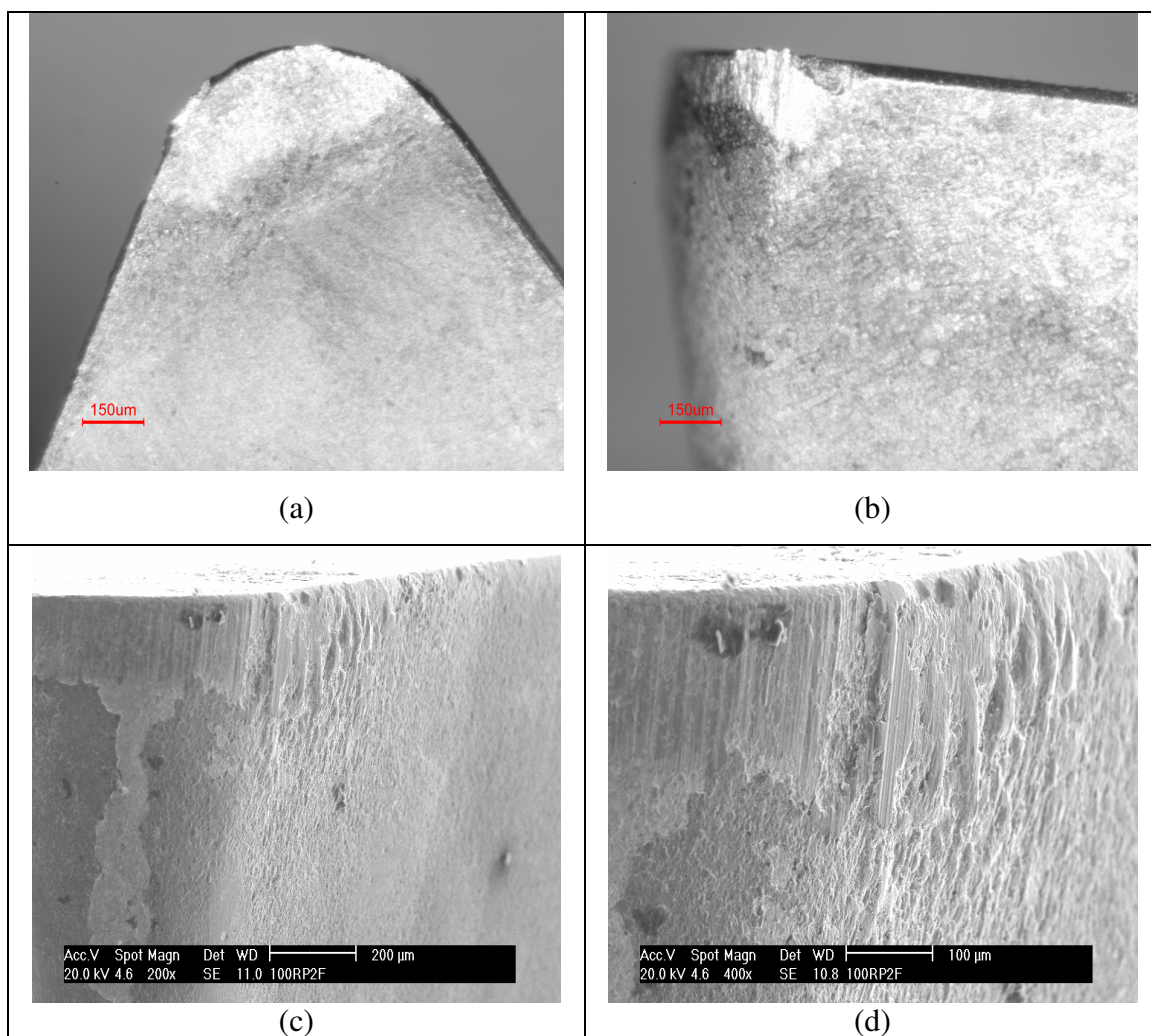


Figura 4.26. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta recoberta (2º ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica. (c) e (d) vista em perfil. MEV.

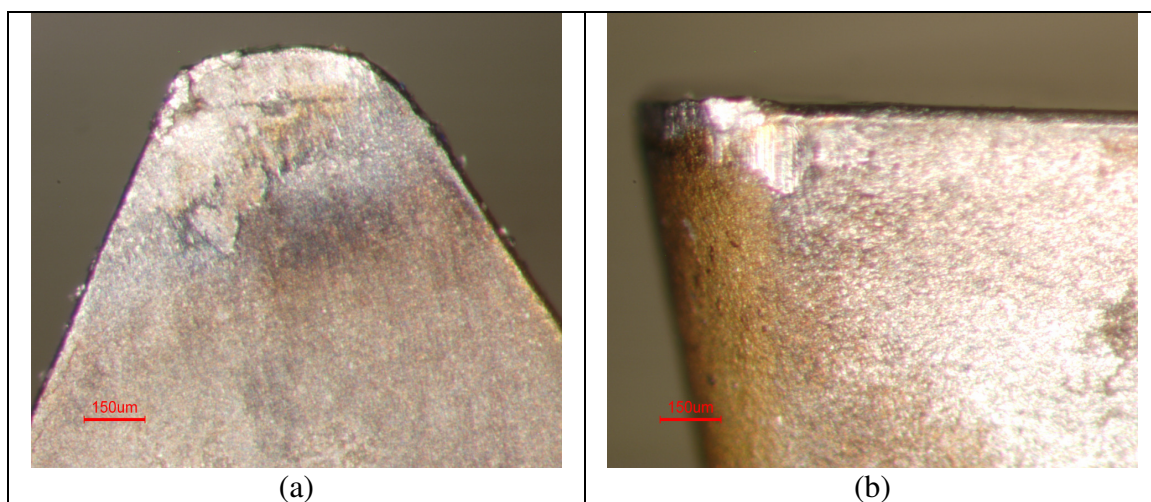


Figura 4.27. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta recoberta (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

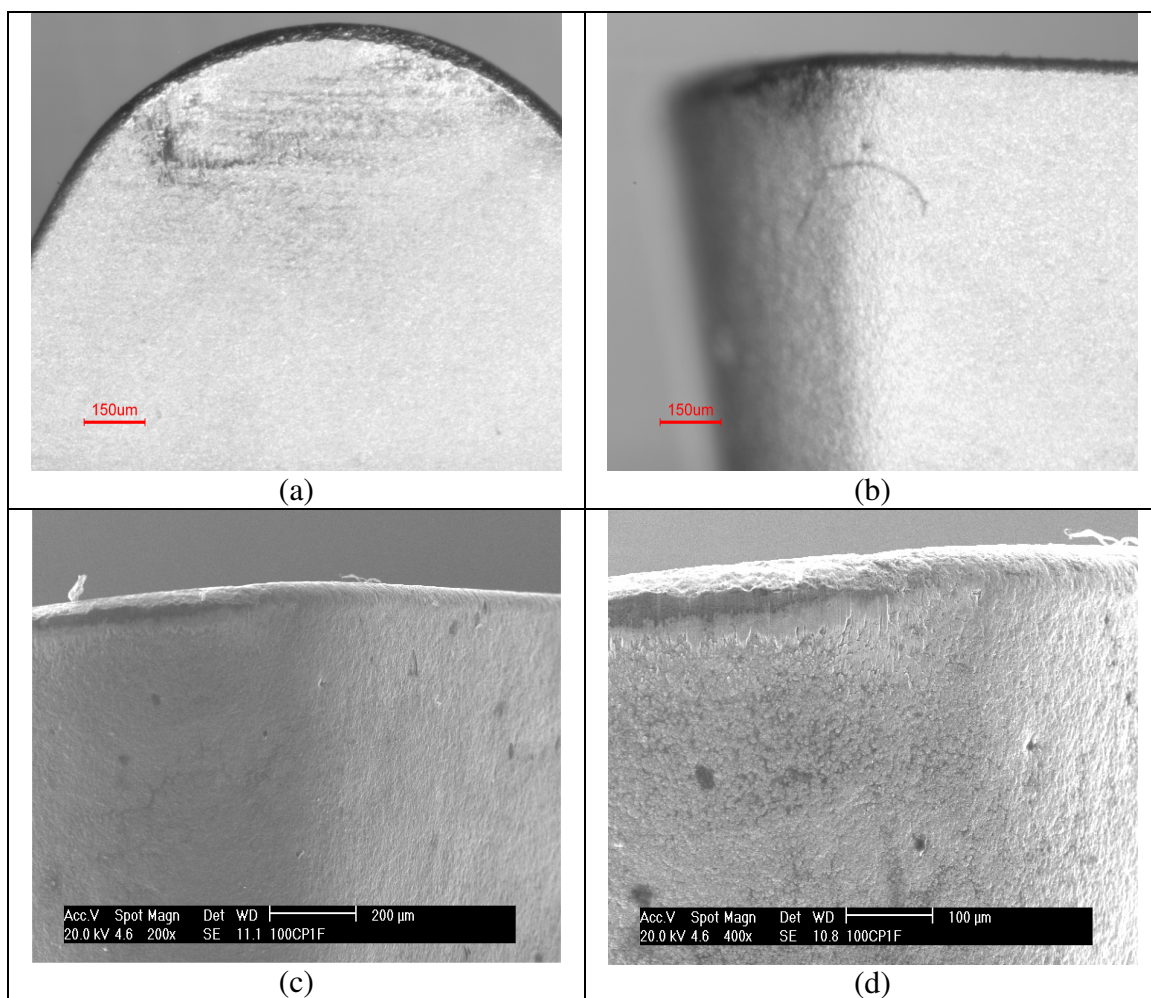


Figura 4.28. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta comercial (1º ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica. (c) e (d) vista em perfil. MEV.

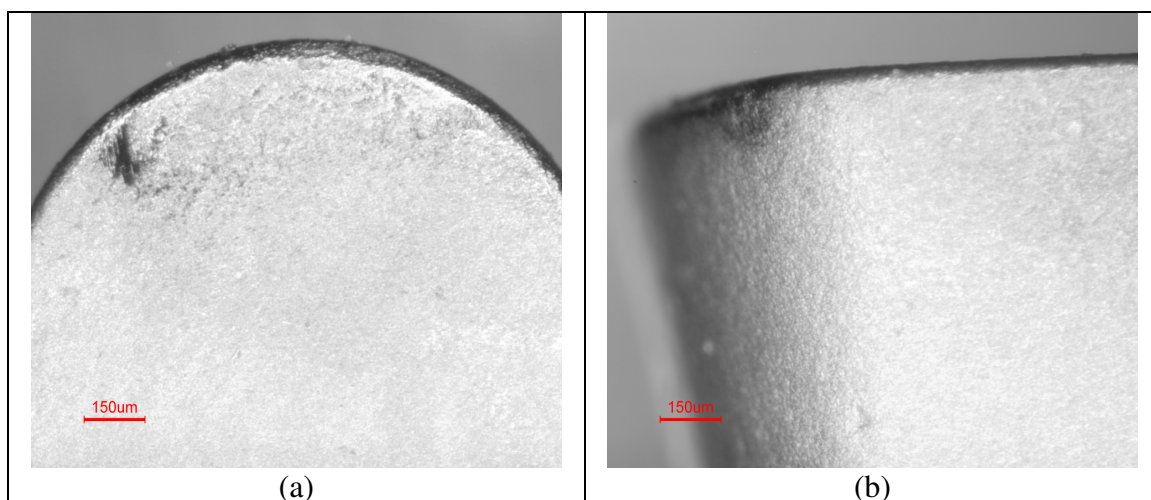


Figura 4.29. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta comercial (2° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

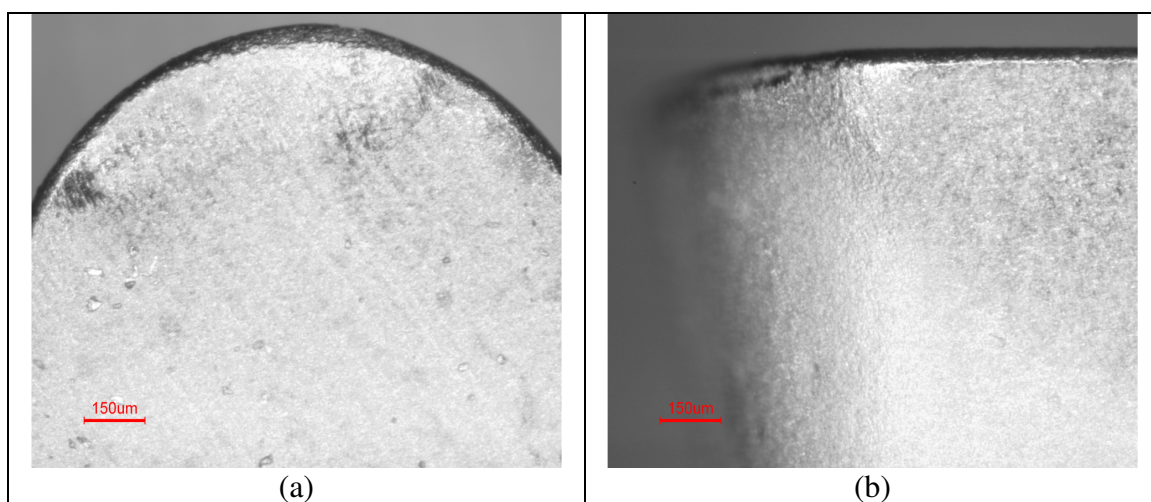


Figura 4.30. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 100m/min e ferramenta comercial (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

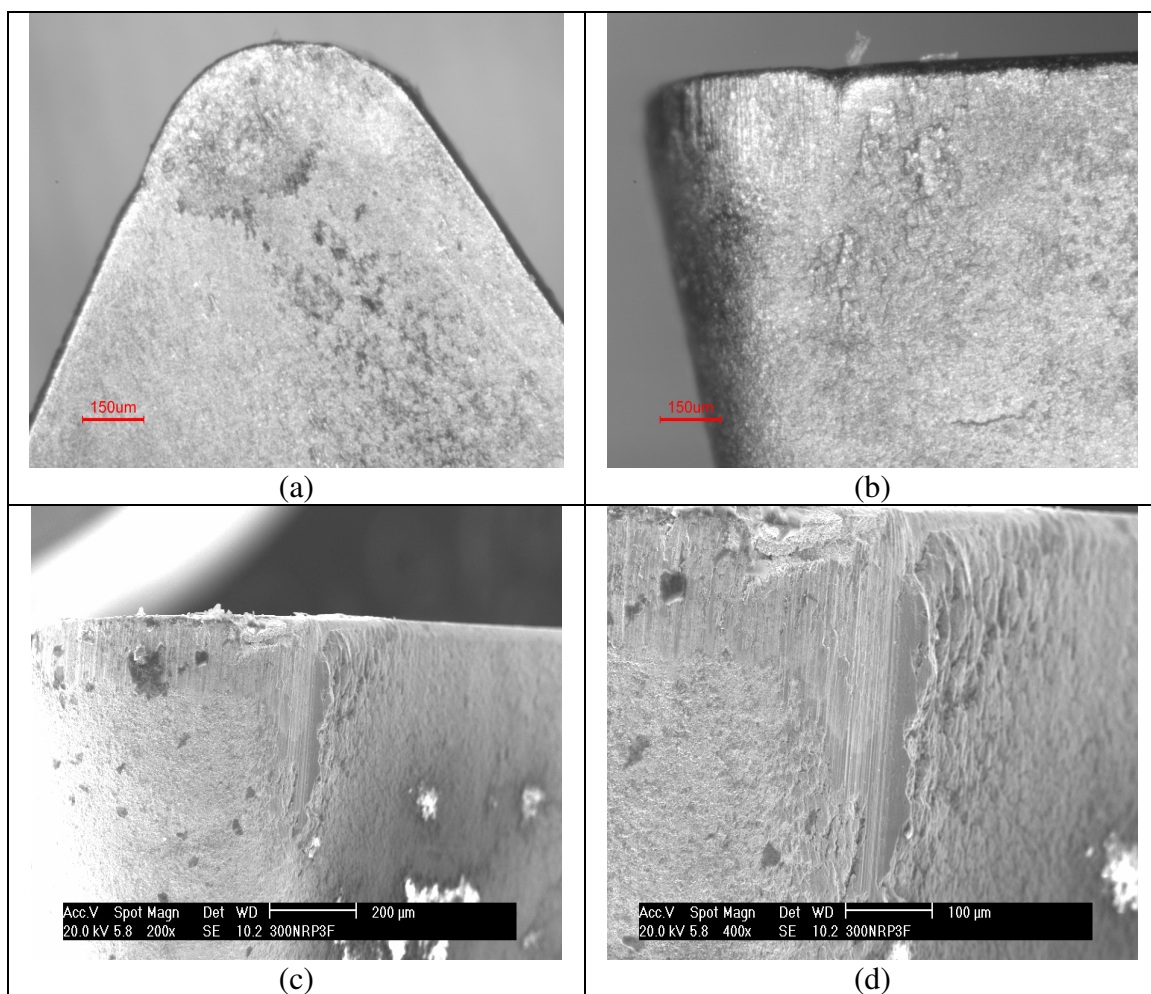


Figura 4.31. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta não recoberta (1° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica. (c) e (d) vista em perfil. MEV.

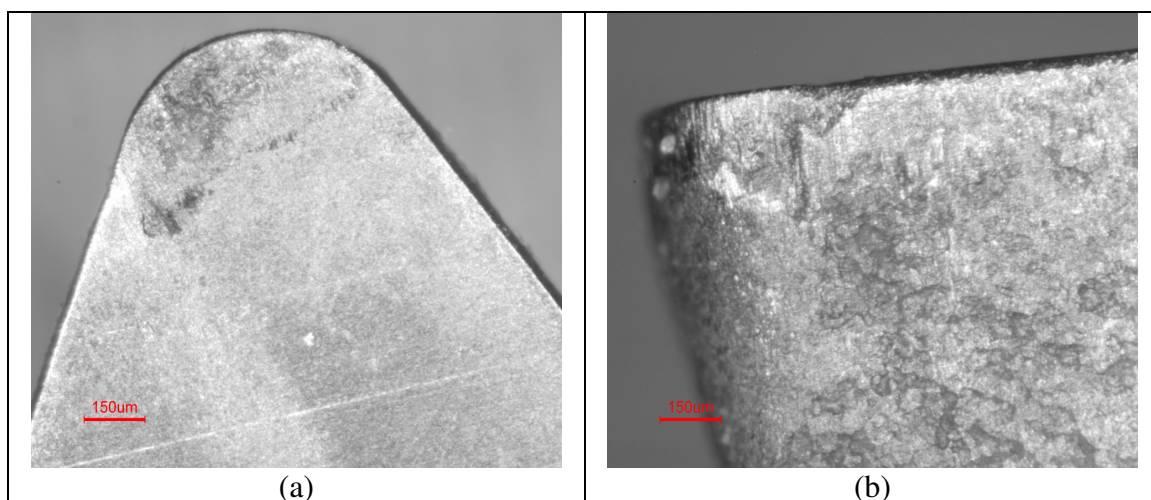


Figura 4.32. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta não recoberta (2° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

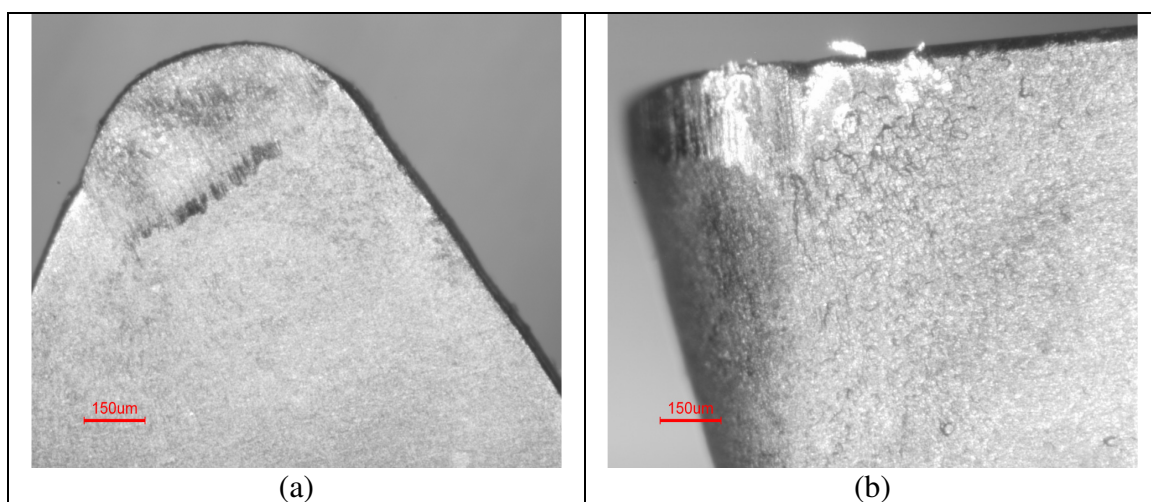


Figura 4.33. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta não recoberta (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

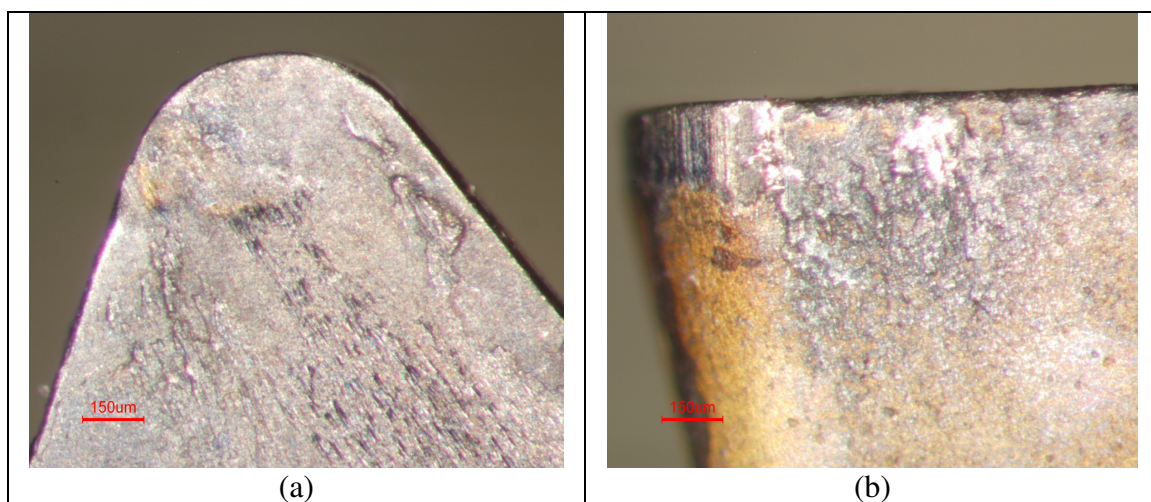


Figura 4.34. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta recoberta (1° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

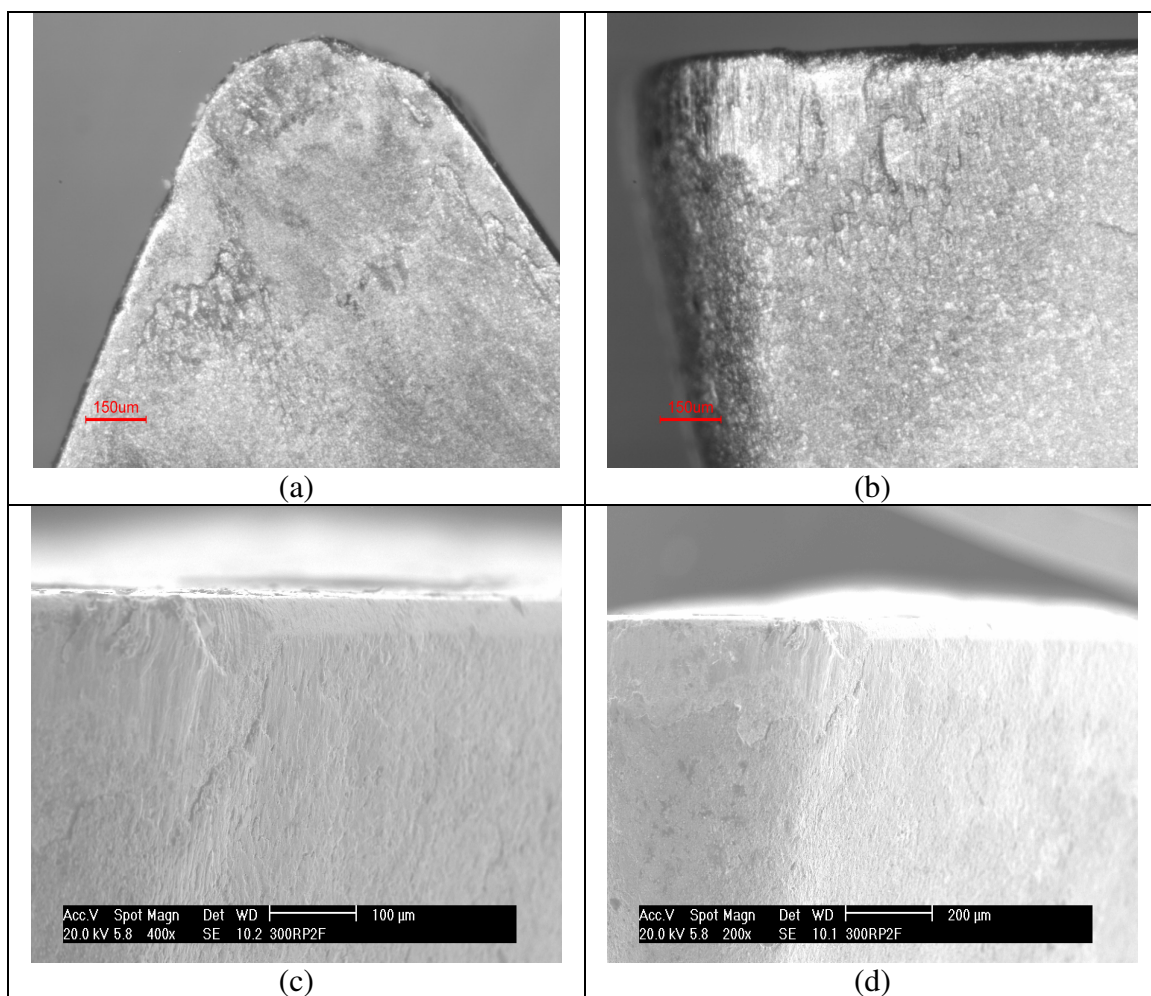


Figura 4.35. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta recoberta (2° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica. (c) e (d) vista em perfil. MEV.

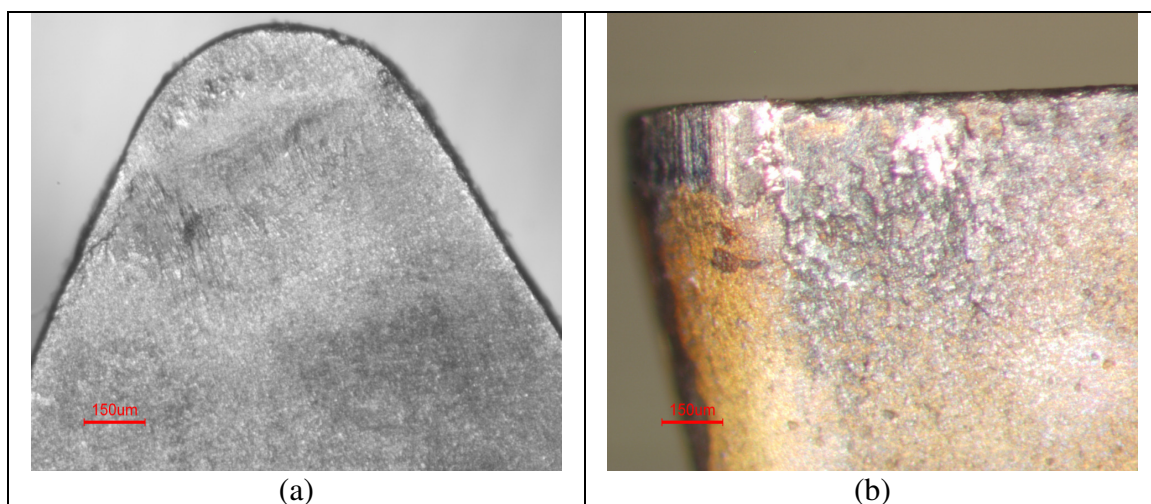


Figura 4.36. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta recoberta (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

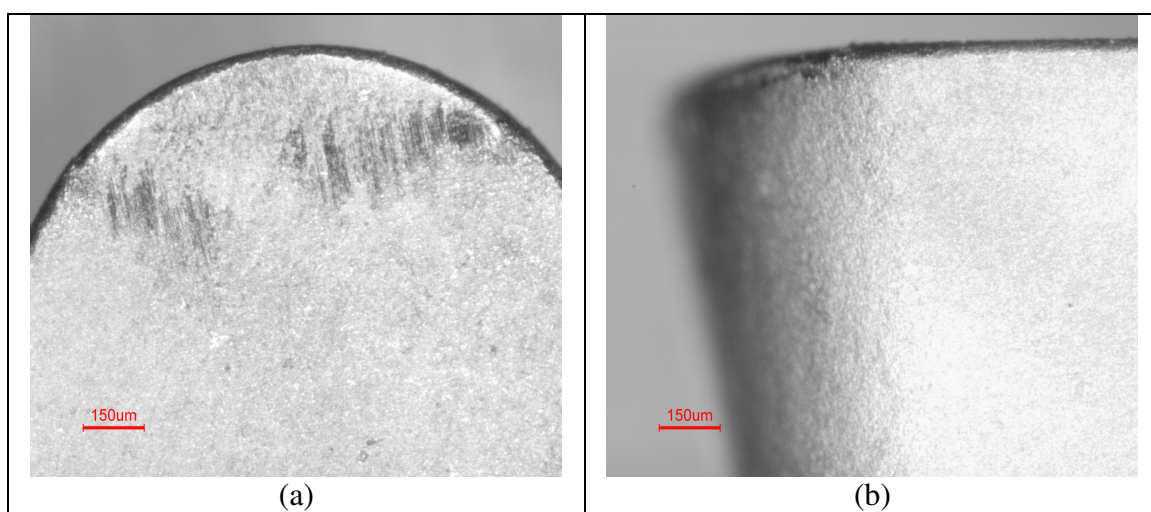


Figura 4.37. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta comercial (1° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

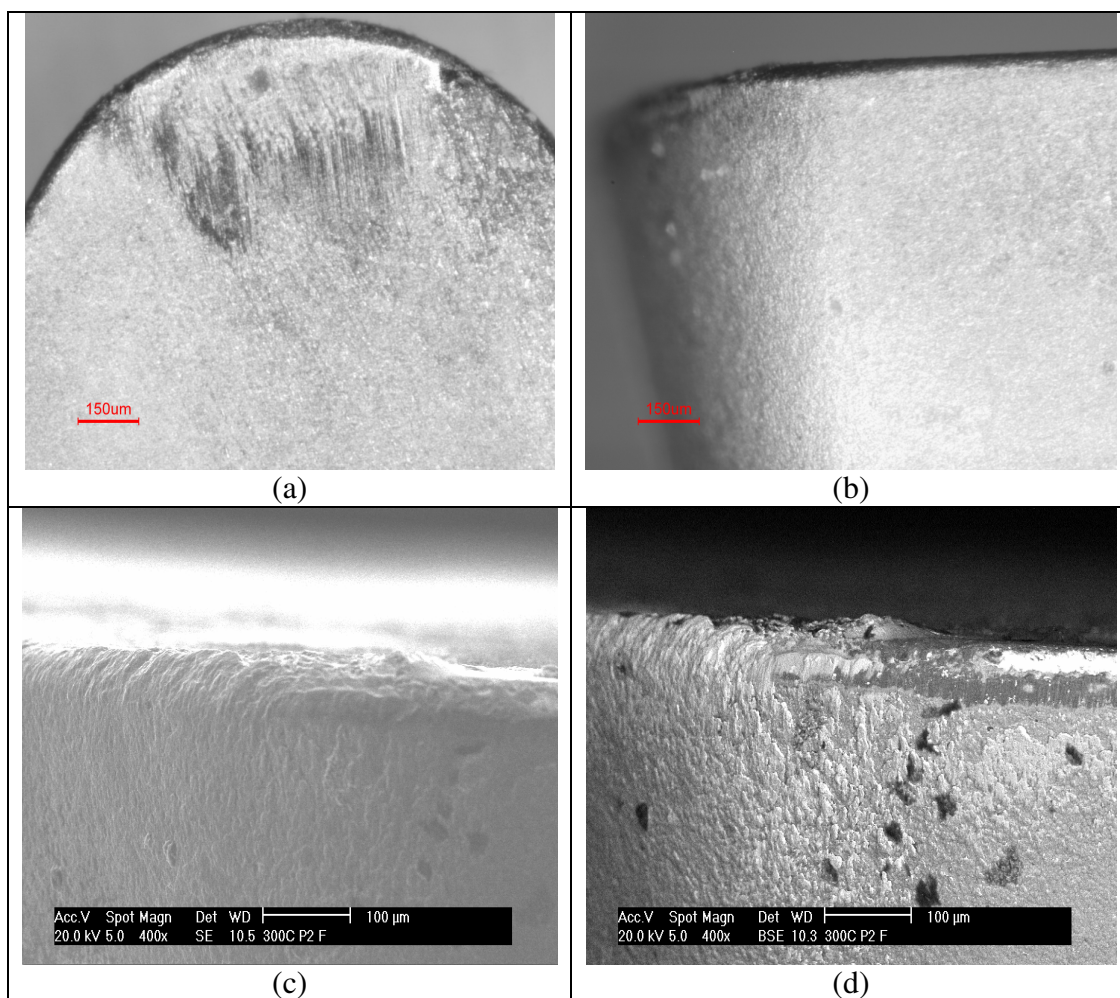


Figura 4.38. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta comercial (2º ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica. (c) e (d) vista em perfil. MEV.

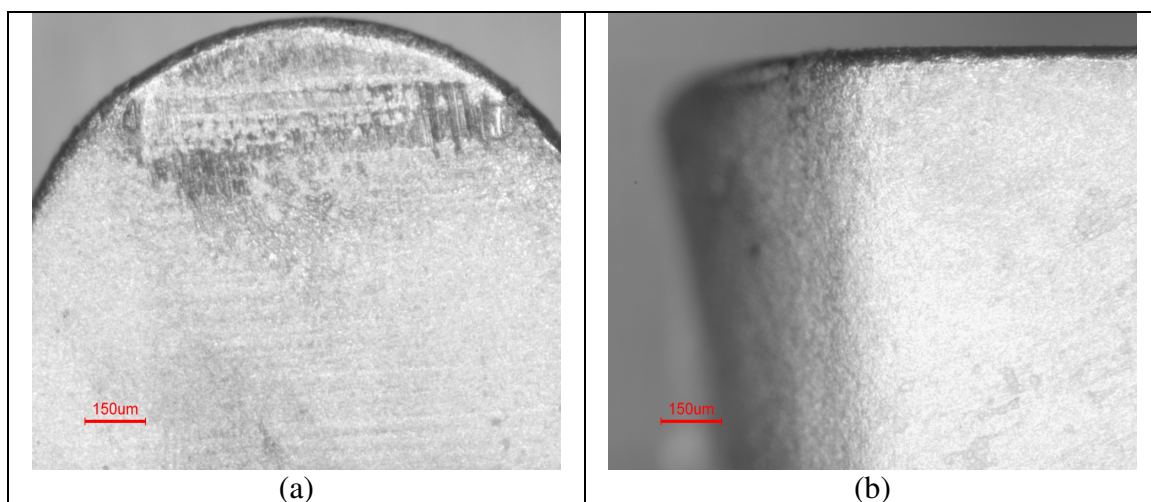


Figura 4.39. Ponta da ferramenta para a condição de velocidade de 300m/min e ferramenta comercial (3° ensaio). (a) vista superior. (b) vista em perfil. Microscopia Óptica.

4.9. Cavaco

A seguir, são apresentadas fotografias do cavaco proveniente do torneamento do aço em estudo para as 9 condições ensaiadas. Sua obtenção foi no decorrer de um dos três ensaios de usinagem correspondente a uma determinada condição de estudo, mas que fosse representativa do comportamento observado. As características do cavaco estão associadas às condições de usinagem, como velocidade de corte, avanço e etc, as quais se mantiveram constantes para cada um dos três ensaios de uma dada condição.



Figura 4.40. Cavaco gerado no torneamento a 10m/min e ferramenta não recoberta.



Figura 4.41. Cavaco gerado no torneamento a 10m/min e ferramenta recoberta.

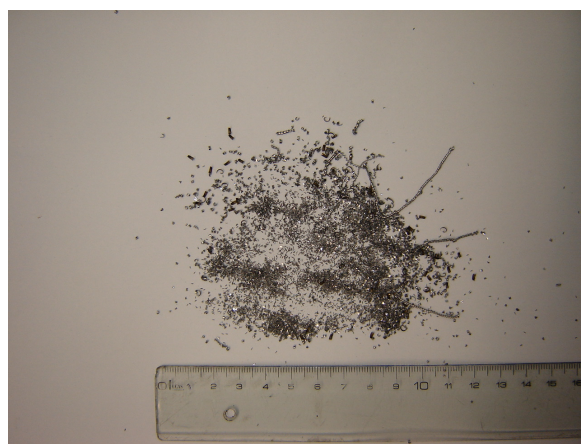


Figura 4.42. Cavaco gerado no torneamento a 10m/min e ferramenta comercial.



Figura 4.43. Cavaco gerado no torneamento a 100m/min e ferramenta não recoberta.



Figura 4.44. Cavaco gerado no torneamento a 100m/min e ferramenta recoberta.



Figura 4.45. Cavaco gerado no torneamento a 100m/min e ferramenta comercial.



Figura 4.46. Cavaco gerado no torneamento a 300m/min e ferramenta não recoberta.



Figura 4.47. Cavaco gerado no torneamento a 300m/min e ferramenta recoberta.



Figura 4.48. Cavaco gerado no torneamento a 300m/min e ferramenta comercial.

5. DISCUSSÕES

5.1. Comparação entre os Microconstituintes

O principal objetivo dessa análise era determinar as propriedades das inclusões. Aplicando o método conhecido como Teste de Hipótese, apresentado no item 3.2.6.1., há 3 comparações a serem verificadas: entre inclusão e perlita, entre inclusão e ferrita, e entre perlita e ferrita. Para a primeira comparação, ou seja, entre *inclusão de MnS* e *perlita*, têm-se: $t_{calc} = 4,80$ e $t_{crit} = t_{13;2,5\%} = 2,16$; como t_{calc} é maior que t_{crit} , é possível constatar que, a uma significância de $\alpha = 5\%$, a perlita possui maior microdureza Vickers que as inclusões. Para a segunda comparação, ou seja, entre *inclusão* e *ferrita*, têm-se: $t_{calc} = 3,097$ e $t_{crit} = t_{23;2,5\%} = 2,069$; como t_{calc} é maior que t_{crit} , é possível constatar que, a uma significância de $\alpha = 5\%$, as inclusões possuem maior microdureza Vickers que a ferrita. Para a terceira comparação, ou seja, entre *perlita* e *ferrita*, têm-se: $t_{calc} = 7,739$ e $t_{crit} = t_{26;2,5\%} = 2,056$; como t_{calc} é maior que t_{crit} , é possível constatar que, a uma significância de $\alpha = 5\%$, a perlita possui maior microdureza Vickers que a ferrita, como era de se esperar. Em resumo, ratificou-se a diferença de microdureza entre as fases, que já era percebida pelos valores médios encontrados nas **tabelas 4.7, 4.8 e 4.9**, onde: *perlita* > *inclusões* > *ferrita*. No entanto, não se pode usar o valor encontrado como quantitativo e sim como qualitativo, pois as inclusões apresentam duas dimensões muito menores que a outra, dificultando uma avaliação precisa. Os resultados obtidos para a perlita e para a ferrita são coerentes.

5.2. Ensaio de Usinagem

Aplicando o método conhecido como Teste de Hipótese, apresentado no item 3.2.5, há 4 comparações a serem verificadas: entre as forças de avanço corrigidas para as condições de ferramenta e para as diferentes velocidades de corte, e entre a pressão de corte experimental (Kse) para as condições de ferramenta e para as diferentes velocidades de corte, as quais são apresentadas a seguir

5.2.1 Comparação entre Forças de Avanço Corrigidas em relação à Velocidade de Corte

Para cada ferramenta, analisa-se como a força de avanço varia em função da velocidade de corte. Para a ferramenta não recoberta, pela simples observação dos resultados (item 4.6), percebe-se que a maior força de avanço corrigida foi obtida para a velocidade de 100m/min seguida pelas velocidades de 300 e 10m/min, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as forças de avanço corrigidas obtidas para a velocidade de 100m/min são superiores às para a velocidade de 10m/min, as forças de avanço corrigidas para a velocidade de 300m/min são superiores às para a velocidade de 10m/min, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a superioridade das forças de avanço corrigidas para a velocidade de 100m/min em relação à velocidade de 300m/min. Para a ferramenta recoberta, pela simples observação dos resultados (item 4.6), percebe-se que a maior força de avanço corrigida foi obtida para a velocidade de 100m/min seguida pelas velocidades de 300 e 10m/min, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as forças de avanço corrigidas obtidas para a velocidade de 100m/min são superiores às para a velocidade de 10m/min, as forças de avanço corrigidas para a velocidade de 300m/min são superiores às para a velocidade de 10m/min, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a superioridade das forças de avanço corrigidas para a velocidade de 100m/min em relação à velocidade de 300m/min. Para a ferramenta comercial, pela simples observação dos resultados (item 4.6), percebe-se que a maior força de avanço corrigida foi obtida para a velocidade de 300m/min seguida pelas velocidades de 10 e 100m/min, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as forças de avanço corrigidas obtidas para a velocidade de 300m/min são superiores às para a velocidade de 100m/min, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a superioridade das forças de avanço corrigidas para a velocidade de 100m/min em relação à velocidade de 300m/min e a superioridade das forças de avanço corrigidas para a velocidade de 10m/min são superiores às para a velocidade de 100m/min.

Das análises anteriores, nota-se um comportamento semelhante entre as condições *não recoberta* e *recoberta*, pois ambas apresentaram a força de avanço corrigida à velocidade de 100m/min e 300m/min superiores à velocidade de

10m/min, sem, contudo, haver diferenciação entre as velocidades de 100 e 300m/min. A partir desse comportamento, é possível inferir que o recobrimento, para as condições ensaiadas, não influencia a força de avanço. O comportamento diferenciado da condição *comercial* em relação às condições *não recoberta* e *recoberta* sugere que a geometria é fator influente para a força de avanço, uma vez que os parâmetros geométricos da ferramenta *comercial*, como raio de ponta da ferramenta e ângulos, são diferentes das outras condições de ferramenta.

5.2.2 Comparação entre Forças de Avanço Corrigidas em relação à Ferramenta

Para cada velocidade de corte, analisa-se como a força de avanço varia em função da condição da ferramenta. Para a velocidade de corte de 10m/min, pela simples observação dos resultados (item 4.6), percebe-se que a maior força de avanço corrigida foi obtida para a ferramenta recoberta seguida pelas ferramentas não recoberta e comercial, nesta ordem. Estatisticamente, não há evidências que comprovem a superioridade das forças de avanço corrigidas para nenhuma das três condições de ferramenta, sendo consideradas, pois, iguais. Para a velocidade de corte de 100m/min, pela simples observação dos resultados (item 4.6), percebe-se que a maior força de avanço corrigida foi obtida para a ferramenta recoberta seguida pelas ferramentas não recoberta e comercial, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as forças de avanço corrigidas obtidas para a ferramenta recoberta são superiores às para a ferramenta comercial, as forças de avanço corrigidas para a ferramenta não recoberta são superiores às para a ferramenta comercial, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a superioridade das forças de avanço corrigidas para a ferramenta recoberta em relação à ferramenta não recoberta. Para a velocidade de corte de 300m/min, pela simples observação dos resultados (item 4.6), percebe-se que a maior força de avanço corrigida foi obtida para a ferramenta recoberta seguida pelas ferramentas não recoberta e comercial, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as forças de avanço corrigidas obtidas para a ferramenta recoberta são superiores às para a ferramenta comercial, as forças de avanço corrigidas para a ferramenta não recoberta são superiores às para a ferramenta comercial, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a

superioridade das forças de avanço corrigidas para a ferramenta recoberta em relação à ferramenta não recoberta.

Do acima exposto, nota-se que, à velocidade de 10m/min, as ferramentas apresentam estatisticamente o mesmo valor para a força de avanço, indicando que o tipo de ferramenta para essa condição de velocidade não interfere nessa componente do esforço de usinagem. Também é possível constatar a igualdade das velocidades 100 e 300m/min no que tange ao comportamento entre as ferramentas. Para ambas, as condições *não recoberta* e *recoberta* apresentaram maior valor para a força de avanço em relação à condição *comercial*, indicando, pois, que, nessas condições de ensaio, o tipo de ferramenta predomina sobre a velocidade.

5.2.3 Comparação entre Pressões de Corte Experimentais em relação à Velocidade de Corte

Para cada ferramenta, analisa-se como a pressão de corte experimental (K_{se}) varia em função da velocidade de corte. Para a ferramenta não recoberta, pela simples observação dos resultados (item 4.6), percebe-se que a maior pressão de corte experimental (K_{se}) foi obtida para a velocidade de 100m/min seguida pelas velocidades de 300 e 10m/min, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as pressões de corte experimentais (K_{se}) obtidas para a velocidade de 300m/min são superiores às para a velocidade de 10m/min, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a superioridade das pressões de corte experimentais (K_{se}) para a velocidade de 100m/min em relação à velocidade de 300m/min e a superioridade das pressões de corte experimentais (K_{se}) para a velocidade de 100m/min em relação à velocidade de 10m/min. Para a ferramenta recoberta, pela simples observação dos resultados (item 5.1.6), percebe-se que a maior pressão de corte experimental (K_{se}) foi obtida para a velocidade de 100m/min seguida pelas velocidades de 300 e 10m/min, nesta ordem. Estatisticamente, não há evidências que comprovem a superioridade das pressões de corte experimentais (K_{se}) para nenhuma das três velocidades de corte, sendo consideradas, pois, iguais. Para a ferramenta comercial, pela simples observação dos resultados (item 4.6), percebe-se que a maior pressão de corte experimental (K_{se}) foi obtida para a velocidade de 10m/min seguida pelas

velocidades de 300 e 100m/min, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as pressões de corte experimentais (Kse) obtidas para a velocidade de 10m/min são superiores às para a velocidade de 100m/min, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a superioridade das pressões de corte experimentais (Kse) para a velocidade de 10m/min em relação à velocidade de 300m/min e a superioridade pressões de corte experimentais (Kse) para a velocidade de 300m/min em relação à velocidade de 100m/min.

Com auxílio das análises precedentes, percebe-se que, para a condição de ferramenta *recoberta*, não houve interferência da velocidade de corte na magnitude da pressão de corte experimental. Entre as condições de ferramenta *não recoberta* e *comercial*, nota-se uma inversão quanto ao comportamento e influência da velocidade na pressão de corte experimental. Enquanto que na condição de ferramenta *não recoberta* o maior valor de Kse foi constatado para as velocidades mais altas (100 e 300m/min apresentaram, inclusive, estatisticamente o mesmo valor), para a condição *comercial*, a velocidade mais baixa produziu o maior valor de Kse.

5.2.4 Comparação entre Pressões de Corte Experimentais em relação à Ferramenta

Para cada velocidade de corte, analisa-se como a pressão de corte experimental (Kse) varia em função da condição da ferramenta. Para a velocidade de corte de 10m/min, pela simples observação dos resultados (item 4.6), percebe-se que a maior pressão de corte experimental (Kse) foi obtida para a ferramenta comercial seguida pelas ferramentas recoberta e não recoberta, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as pressões de corte experimentais (Kse) obtidas para a ferramenta comercial são superiores às para a ferramenta não recoberta, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a superioridade das pressões de corte experimentais (Kse) para a ferramenta comercial em relação à ferramenta recoberta e a superioridade das pressões de corte experimentais (Kse) para a ferramenta recoberta em relação à ferramenta não recoberta. Para cada velocidade de corte, analisa-se como a pressão de corte experimental (Kse) varia em função da condição

da ferramenta. Para a velocidade de corte de 100m/min, pela simples observação dos resultados (item 4.6), percebe-se que a maior pressão de corte experimental (Kse) foi obtida para a ferramenta recoberta seguida pelas ferramentas não recoberta e comercial, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as pressões de corte experimentais (Kse) obtidas para a ferramenta recoberta são superiores às para a ferramenta comercial, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a superioridade das pressões de corte experimentais (Kse) para a ferramenta recoberta em relação à ferramenta não recoberta e a superioridade das pressões de corte experimentais (Kse) para a ferramenta não recoberta em relação à ferramenta comercial. Para a velocidade de corte de 300m/min, pela simples observação dos resultados (item 4.6), percebe-se que a maior pressão de corte experimental (Kse) foi obtida para a ferramenta recoberta seguida pelas ferramentas não recoberta e comercial, nesta ordem. Estatisticamente, não há evidências que comprovem a superioridade das pressões de corte experimentais (Kse) para nenhuma das três condições de ferramenta, sendo consideradas, pois, iguais.

Das análises acima, nota-se que analisar o comportamento da ferramenta na usinabilidade do aço em estudo varia quanto à abordagem ser pela força de avanço ou pela pressão de corte experimental. Se pela força de avanço, à velocidade de 10m/min, não havia diferença entre o comportamento das ferramentas, pela pressão de corte experimental é, à velocidade de 300m/min, que não são constatadas diferenças no comportamento das ferramentas. Contudo, o comportamento das ferramentas em relação ao esforço de usinagem à velocidade crítica de operação (100m/min) foi similar em ambas as abordagens.

5.3. Rugosidade

5.3.1 Comparação entre Rugosidades Médias em relação à Velocidade de Corte

Para cada ferramenta, analisa-se como a rugosidade média (Ra) varia em função da velocidade de corte. Para a ferramenta não recoberta, pela simples observação dos resultados (item 4.7), percebe-se que a maior rugosidade média (Ra) foi obtida para a velocidade de 300m/min seguida pelas velocidades de 100 e

10m/min, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as rugosidades médias (Ra) obtidas para a velocidade de 300m/min são superiores às para a velocidade de 100m/min, as rugosidades médias (Ra) obtidas para a velocidade de 300m/min são superiores às para a velocidade de 10m/min, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a superioridade das rugosidades médias (Ra) para a velocidade de 100m/min em relação à velocidade de 10m/min. Para a ferramenta recoberta, pela simples observação dos resultados (item 4.7), percebe-se que a maior rugosidade média (Ra) foi obtida para a velocidade de 300m/min seguida pelas velocidades de 100 e 10m/min, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as rugosidades médias (Ra) obtidas para a velocidade de 300m/min são superiores às para a velocidade de 100m/min, as rugosidades médias (Ra) obtidas para a velocidade de 300m/min são superiores às para a velocidade de 10m/min e as rugosidades médias (Ra) obtidas para a velocidade de 100m/min são superiores às para a velocidade de 10m/min. Esse resultado deve ter sido causado por ocorrência de vibração, pois há uma tendência à diminuição da rugosidade com o aumento da velocidade de corte para as faixas de velocidade estudadas. Para a ferramenta comercial, pela simples observação dos resultados (item 4.7), percebe-se que a maior rugosidade média (Ra) foi obtida para a velocidade de 10m/min seguida pelas velocidades de 100 e 300m/min, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as rugosidades médias (Ra) obtidas para a velocidade de 10m/min são superiores às para a velocidade de 300m/min, as rugosidades médias (Ra) obtidas para a velocidade de 100m/min são superiores às para a velocidade de 300m/min, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a superioridade das rugosidades médias (Ra) para a velocidade de 10m/min em relação à velocidade de 100m/min.

Do exposto anteriormente, observa-se que o comportamento da condição de ferramenta *comercial* está dentro do esperado tanto pela experiência nos ensaios quanto pela bibliografia pesquisada, pois as velocidades mais baixas apresentaram um acabamento superficial mais grosseiro. Todavia, as condições de ferramenta *não recoberta* e *recoberta* apresentaram melhor acabamento superficial nas velocidades mais baixas e, à velocidade de 300m/min (maior velocidade ensaiada), o acabamento foi mais grosseiro. O comportamento anômalo citado pode estar associado à vibração ocorrida durante os ensaios de torneamento para as velocidades mais baixas,

salientando-se que a condição *comercial* mostrou-se menos influenciável. Vale aventar também a hipótese da influência do cavaco, pois as condições *não recoberta* e *recoberta*, apresentaram cavaco contínuo à velocidade de 300m/min, enquanto que a ferramenta *comercial* apresentou cavaco em lascas, e a presença do cavaco em meio à usinagem de um material pode prejudicar-lhe o acabamento superficial, aumentando, conseqüentemente, os valores de rugosidade medidos.

5.3.2 Comparação entre Rugosidades Médias em relação à Ferramenta

Para cada velocidade de corte, analisa-se como a rugosidade média (Ra) varia em função da condição da ferramenta. Para a velocidade de corte de 10m/min, pela simples observação dos resultados (item 4.7), percebe-se que a maior rugosidade média (Ra) foi obtida para a ferramenta comercial seguida pelas ferramentas não recoberta e recoberta, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as rugosidades médias (Ra) obtidas para a ferramenta comercial são superiores às para a ferramenta não recoberta, as rugosidades médias (Ra) obtidas para a ferramenta comercial são superiores às para a ferramenta recoberta, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a superioridade das rugosidades médias (Ra) para a ferramenta não recoberta em relação à ferramenta recoberta. Para cada velocidade de corte, analisa-se como a rugosidade média (Ra) varia em função da condição da ferramenta. Para a velocidade de corte de 100m/min, pela simples observação dos resultados (item 4.7), percebe-se que a maior rugosidade média (Ra) foi obtida para a ferramenta comercial seguida pelas ferramentas recoberta e não recoberta, nesta ordem. Estatisticamente, comprova-se que: as rugosidades médias (Ra) obtidas para a ferramenta comercial são superiores às para a ferramenta recoberta, as rugosidades médias (Ra) obtidas para a ferramenta comercial são superiores às para a ferramenta não recoberta, contudo não houve evidência estatística que comprovasse a superioridade das rugosidades médias (Ra) para a ferramenta recoberta em relação à ferramenta não recoberta. Para a velocidade de corte de 300m/min, pela simples observação dos resultados (item 4.7), percebe-se que a maior rugosidade média (Ra) foi obtida para a ferramenta recoberta seguida pelas ferramentas não recoberta e comercial, nesta ordem. Estatisticamente,

comprova-se que: as rugosidades médias (Ra) obtidas para a ferramenta recoberta são superiores às para a não recoberta, as rugosidades médias (Ra) obtidas para a ferramenta recoberta são superiores às para a ferramenta comercial e as rugosidades médias (Ra) obtidas para a ferramenta não recoberta são superiores às para a ferramenta comercial.

De acordo com estudo anterior, apresentado na literatura [10], é possível constatar que o aumento do raio de ponta torna a ponta da ferramenta mais resistente, porém também aumenta a vibração da ferramenta devido ao aumento do atrito causado pela maior área de contato entre a ferramenta e a peça. O acabamento da superfície depende muito da relação entre o avanço e raio de ponta, mais especificamente, do inverso do raio de ponta da ferramenta, como se segue:

$$R_{teórica} = \frac{f^2}{8 \cdot r_{ponta}} . \text{ O valor de rugosidade que segue essa relação é o menor valor de}$$

rugosidade possível de ser obtido em um processo de torneamento. Normalmente, a rugosidade real obtida é maior do que a obtida pela relação entre avanço e raio de ponta, devido a fatores como vibração (um raio de ponta grande, por um lado, diminui a rugosidade pela diminuição da contribuição geométrica, mas por outro aumenta a rugosidade devido ao aumento da vibração), deformação do cavaco, fluxo lateral do cavaco etc.

Pôde-se, dessa forma, constatar a validade da relação de rugosidade com o inverso do raio de ponta da ferramenta apenas para a condição de velocidade de 300m/min, na qual a ferramenta *comercial* (raio de ponta de 0,8mm) apresentou valores menores de rugosidade em comparação às ferramentas *não recoberta* e *recoberta* (ambas com raio de ponta de 0,4mm). As velocidades de corte 10 e 100m/min apresentaram o mesmo comportamento da rugosidade em relação à condição da ferramenta, isto é, para ambas a ferramenta *comercial* produziu pior acabamento superficial, enquanto que o acabamento obtido pelas condições *não recoberta* e *recoberta* foi estatisticamente idêntico. Dessa forma, há a indicação de que para as velocidades de 10 e 100m/min a geometria da ferramenta é o fator preponderante sobre o recobrimento e a própria velocidade, quando se avalia a rugosidade do aço.

5.4. Desgaste de Ferramenta

As análises de desgaste de ferramenta são pautadas, sobretudo, na verificação qualitativa das avarias nas superfícies das ferramentas, mediante a utilização das imagens obtidas por microscopia óptica (para todos os ensaios) e microscopia eletrônica de varredura (apenas para os ensaios mais representativos de cada condição de estudo). Análises advindas de estudo de comportamento e mecanismo de desgaste não são consideradas na presente seção. Dessa forma, há de se avaliar o comportamento, ante a usinagem, para cada ferramenta e entre as ferramentas nas três velocidades de corte utilizadas neste trabalho. Nas presentes análises são apenas considerados os ensaios mais representativos de cada condição, para os quais se dispõem de imagens de microscopia eletrônica de varredura, além de óptica, e cujas avarias, por serem mais intensas, são mais facilmente detectáveis e verificáveis.

Para a velocidade de 10m/min, a condição de ferramenta *não recoberta* é mais bem representada pelo 1º ensaio, assim como para a condição *recoberta*, já a condição de ferramenta *comercial* é mais bem representada pelo 2º ensaio. Comparando as imagens das **figuras 4.13, 4.16 e 4.20**, para as condições de ferramenta *não recoberta*, *recoberta* e *comercial*, respectivamente, é possível constatar um maior desgaste de ferramenta na condição *não recoberta*, seguida pelas condições *recoberta* e *comercial*, nesta ordem. Na **figura 4.13** (*não recoberta*), é perceptível a presença de avarias na superfície da ferramenta a distâncias superiores a 200µm da borda superior, já na **figura 4.16** (*recoberta*), tal percepção circunscreve-se apenas a 100 µm da borda e, por fim, na **figura 4.20** (*comercial*), as avarias são encontradas apenas na proximidade da borda, não ultrapassando 20 µm de distância.

Para a velocidade de 100m/min, a condição de ferramenta *não recoberta* é mais bem representada pelo 1º ensaio, assim como para a condição *comercial*, já a condição de ferramenta *recoberta* é mais bem representada pelo 2º ensaio. Comparando as imagens das **figuras 4.22, 4.26 e 4.28**, para as condições de ferramenta *não recoberta*, *recoberta* e *comercial*, respectivamente, é possível constatar diferença de ferramenta na condição *não recoberta*, seguida pelas condições *recoberta* e *comercial*, nesta ordem. Evidencia-se a formação de aresta

postiça, mas não se verifica um desgaste acentuado. Na **figura 4.22** (*não recoberta*), é perceptível a presença de avarias na superfície da ferramenta a distâncias superiores a 600µm da borda superior, além da presença de material aderido, evidenciando a formação de aresta postiça. Já na **figura 4.26** (*recoberta*), tal percepção também ultrapassa a distância de 600 µm da borda, sem, contudo, apresentar a formação de aresta postiça tão acentuada na região de borda, embora haja. Por fim, na **figura 4.28**, as avarias estão restritas a uma distância de 50 µm e não se observa a formação de aresta postiça.

Para a velocidade de 300m/min, a condição de ferramenta *não recoberta* é mais bem representada pelo 1º ensaio, já a condição de ferramenta *recoberta* é mais bem representada pelo 2º ensaio, assim como para a condição *comercial*. Comparando as imagens das **figuras 4.31, 4.35 e 4.38**, para as condições de ferramenta *não recoberta*, *recoberta* e *comercial*, respectivamente, é possível constatar uma maior alteração na ferramenta na condição *não recoberta*, seguida pelas condições *recoberta* e *comercial*, nesta ordem. Na **figura 4.31** (*não recoberta*), é perceptível a presença de avarias na superfície da ferramenta a distâncias até 400µm da borda superior, já na **figura 4.35** (*recoberta*), tal percepção não ultrapassa a distância de 200 µm da borda e, por fim, na **figura 4.38** (*comercial*), as avarias são encontradas apenas na proximidade da borda, não ultrapassando 50 µm de distância.

De todo o exposto acima, percebe-se que a velocidade de corte de 100m/min representa a condição mais crítica no que concerne ao dano na ferramenta. Todas as três condições de ferramenta sofreram maiores danos quanto à forma e ao aspecto superficial nessa velocidade. A velocidade de 300m/min apresentou danos ou alterações na ferramenta intermediários e a velocidade de 10m/min apresentou os menores danos ou alterações na ferramenta, ambas para as três condições de ferramenta.

5.5. Cavaco

As análises referentes ao cavaco, nesta seção, são qualitativas, considerando-se como alvo do estudo somente a forma do cavaco, que pode ser: cavaco em fita, cavaco helicoidal, cavaco espiral e cavaco em lascas ou pedaços [11]. Para a

velocidade de 10m/min, as condições de ferramenta *não recoberta* (**figura 4.40**) e *recoberta* (**figura 4.41**) possuem o cavaco, advindo do torneamento, sob a forma de lascas ou pedaços. A condição de ferramenta *comercial* (**figura 4.42**), além do cavaco majoritariamente em forma de lascas, também o apresentou sob forma helicoidal, que, geralmente, é a forma mais conveniente quando são considerados os vários processos de usinagem. Para a velocidade de 100m/min, as condições de ferramenta *não recoberta* (**figura 4.43**) e *recoberta* (**figura 4.44**) produziram cavacos sob a forma helicoidal. Já a condição de ferramenta *comercial* (**figura 4.45**) apresentou o cavaco sob forma de lascas. Para a velocidade de 300m/min, as condições de ferramenta *não recoberta* (**figura 4.46**) e *recoberta* (**figura 4.47**) produziram cavacos sob a forma de uma fita longa e contínua de largura dentro de alguns poucos milímetros, o que, a princípio, pode prejudicar a usinagem do aço, já que a geração de um cavaco descontínuo supera, em vantagem prática, o cavaco contínuo no que tange à facilidade de remoção da área de corte e, por conseguinte, à prevenção de material aderido à ferramenta. Já a condição de ferramenta *comercial* (**figura 4.48**), além do cavaco majoritariamente em forma de fita, também o apresentou sob forma de lascas.

Para todas as velocidades, percebe-se que a ferramenta *comercial* tem a tendência de tornar o cavaco sob forma de lascas ou pedaços, mesmo quando essa forma não é a predominante, como à velocidade de corte de 300m/min, o que é explicado pela sua geometria diferenciada em relação às outras condições de ferramenta.

6. CONCLUSÕES

Deste trabalho, portanto, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

1. Nota-se um comportamento semelhante, quanto à força de avanço corrigida, entre as condições *não recoberta* e *recoberta*, pois ambas apresentaram a força de avanço corrigida à velocidade de 100m/min e 300m/min superiores à velocidade de 10m/min, sem, contudo, haver diferenciação entre as velocidades de 100 e 300m/min. A partir desse comportamento, é possível inferir que o recobrimento, para as condições ensaiadas, não influencia a força de avanço. O comportamento diferenciado da condição *comercial* em relação às condições *não recoberta* e *recoberta* sugere que a geometria é fator influente para a força de avanço, uma vez que os parâmetros geométricos da ferramenta *comercial*, como raio de ponta da ferramenta e ângulos, são diferentes das outras condições de ferramenta.

2. Nota-se que, à velocidade de 10m/min, as ferramentas apresentam estatisticamente o mesmo valor para a força de avanço, indicando que o tipo de ferramenta para essa condição de velocidade não interfere nessa componente do esforço de usinagem. Também é possível constatar a igualdade das velocidades 100 e 300m/min no que tange ao comportamento entre as ferramentas. Para ambas, as condições *não recoberta* e *recoberta* apresentaram maior valor para a força de avanço em relação à condição *comercial*, indicando, pois, que, nessas condições de ensaio, o tipo de ferramenta predomina sobre a velocidade.

3. Constata-se que, para a condição de ferramenta *recoberta*, não houve interferência da velocidade de corte na magnitude da pressão de corte experimental. Entre as condições de ferramenta *não recoberta* e *comercial*, nota-se uma inversão quanto ao comportamento e influência da velocidade na pressão de corte experimental. Enquanto que na condição de ferramenta *não recoberta* o maior valor de K_{se} foi constatado para as velocidades mais altas (100 e 300m/min apresentaram, inclusive, estatisticamente o mesmo valor), para a condição *comercial*, a velocidade mais baixa produziu o maior valor de K_{se} .

4. Nota-se que analisar o comportamento da ferramenta na usinabilidade do aço em estudo varia quanto à abordagem ser pela força de avanço ou pela pressão de corte experimental. Se pela força de avanço, à velocidade de 10m/min, não havia diferença entre o comportamento das ferramentas, pela pressão de corte experimental é, à velocidade de 300m/min, que não são constatadas diferenças no comportamento das ferramentas. Contudo, o comportamento das ferramentas em relação ao esforço de usinagem à velocidade crítica de operação foi similar em ambas as abordagens.

5. Observa-se que o comportamento da condição de ferramenta *comercial* está dentro do esperado tanto pela experiência nos ensaios quanto pela bibliografia pesquisada, pois as velocidades mais baixas apresentaram um acabamento superficial mais grosseiro. Todavia, as condições de ferramenta *não recoberta* e *recoberta* apresentaram melhor acabamento superficial nas velocidades mais baixas e, à velocidade de 300m/min (maior velocidade ensaiada), o acabamento foi mais grosseiro. O comportamento anômalo citado pode estar associado à vibração ocorrida durante os ensaios de torneamento para as velocidades mais baixas, salientando-se que a condição *comercial* mostrou-se menos influenciável. Vale aventar também a hipótese da influência do cavaco, pois as condições *não recoberta* e *recoberta*, apresentaram cavaco contínuo à velocidade de 300m/min, enquanto que a ferramenta *comercial* apresentou cavaco em lascas, e a presença do cavaco em meio à usinagem de um material pode prejudicar-lhe o acabamento superficial, aumentando, conseqüentemente, os valores de rugosidade medidos.

6. Pôde-se constatar a validade da relação de rugosidade com o inverso do raio de ponta da ferramenta apenas para a condição de velocidade de 300m/min, na qual a ferramenta *comercial* (raio de ponta de 0,8mm) apresentou valores menores de rugosidade em comparação às ferramentas *não recoberta* e *recoberta* (ambas com raio de ponta de 0,4mm). As velocidades de corte 10 e 100m/min apresentaram o mesmo comportamento da rugosidade em relação à condição da ferramenta, isto é, para ambas a ferramenta *comercial* produziu pior acabamento superficial, enquanto que o acabamento obtido pelas condições *não recoberta* e *recoberta* foi estatisticamente idêntico. Dessa forma, há a indicação de que para as velocidades de

10 e 100m/min a geometria da ferramenta é o fator preponderante sobre o recobrimento e a própria velocidade, quando se avalia a rugosidade do aço.

7. Percebe-se que a velocidade de corte de 100m/min representa a condição mais crítica no que concerne ao desgaste e formação de aresta postiça na ferramenta. Todas as três condições de ferramenta sofreram maiores danos quanto à forma e ao aspecto superficial nessa velocidade. A velocidade de 300m/min apresentou desgastes de ferramenta intermediários e a velocidade de 10m/min apresentou os menores desgastes de ferramenta, ambas para as três condições de ferramenta.

8. Para todas as velocidades, percebe-se que a ferramenta *comercial* tem a tendência de tornar o cavaco sob forma de lascas ou pedaços, mesmo quando essa forma não é a predominante, como à velocidade de corte de 300m/min, o que é explicado pela sua geometria diferenciada em relação às outras condições de ferramenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KALPAKJIAN, S. SCHMID, S. R. *Manufacturing Engineering and Technology*. USA. Prentice Hall. 4ª edição. 2000.
2. *Metals Handbook - Machining*. USA. ASM, vol 16, 1989.
3. PECKENER, D.; BERNSTEIN, I.M. *Handbook of Stainless Steels*. USA. McGraw Hill, 1977. Cap. 24.
4. SHAW, M. C. *Metal Cutting Principles*. Great Britan.Clarendon Press. 1984.
5. GRZESIK, W. A revised model for predicting surface roughness in turning. *Wear*. Vol. 194. pp. 143-148. 1996.
6. ABOUELATTA, O. B.; MÁLD, J, Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 118, pp. 269-277, 2001.
7. KOVAC, P., SIDJANIN, L. Investigation of chip formation during milling. *International Journal of Production Economics*. Vol. 51, pp. 149-153, 1997.
8. SAI, W. B.; SALH, N. B.; LEBRUN, J. L., Influence of machining by finishing milling on surface characteristics. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*. Vol. 41, pp. 443-450, 2001.
9. JANG, D. Y.; Choi, Y.Gu; KIM, H-Gil; HSIO, A. Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop on line roughness measuring technique in hard turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*. Vol. 36, pp. 453-464, 1996.
10. DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. São Paulo. Editora Artliber. 2ª edição. 2000.
11. FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*.São Paulo. Edgard Blücher Ltda.1977.
12. NORMAS ABNT. *Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais*. NBR
13. TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. *Metal Cutting*. USA. Butterworth-Heinemann. 4ª edição. 2000.6162. Brasil. 1989.
14. *Catálogo de Dinamômetros Piezoelétricos* – Kiestler AG.

15. KATAYAMA, S.; HASHIMURA, M. Effect of carbon phosphorus and nitrogen contents in steel on machined surface cutting. *ISIJ International*. V. 30. pp. 457-563, 1990.
16. AXINTE, D.A.; BELLUCO, H.; De CHIFFRE, L. Evaluation of cutting force uncertain components in turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*. Vol. 41, pp. 719-730, 2001.
17. GUIMARÃES, A.R. *Sistema para a medição das componentes da força de usinagem em operações de torneamento*. Trabalho de Formatura. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2000.
18. STRAFFORD, K. N. Indirect monitoring of machinability in carbon steels by measurement of cutting forces. *Journal of Materials Processing Technology*. V. 67. pp. 150-156, 1997.
19. DIMLA E. DINLA Sr., Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*. Vol. 40, pp. 1073-1098, 2000.
20. DIMLA E. DINLA Sr.; Lister, P.M. On-line metal cutting tool condition monitoring. I: Force and vibration analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*. Vol. 40, pp. 739-768, 2000.
21. HAMID, A. A.; Ali, Y. Experimental determination of dynamic forces during transient orthogonal turning. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 55, pp. 162-170, 1995.
22. LIN, W. S.; LEE, B. Y.; WU, C. L. Modeling the surface roughness and cutting force for turning. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 108, pp. 286-293, 2001.
23. COSTA NETO, P. L. O. *Estatística*. São Paulo. Edgard Blücher. 1977.
24. CALLISTER, W. D. Jr. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. LTC. 5ª edição. 2000.