

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE COMPARATIVA DA VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE
ALISADORA (*WIPER*) E CONVENCIONAL (*STANDARD*) NO TORNEAMENTO
DE ACABAMENTO DO AÇO SAE 4140.

por

Alexandre Souza Azambuja

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Escola de Engenharia (EE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2012.

ANÁLISE COMPARATIVA DA VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE
ALISADORA (*WIPER*) E CONVENCIONAL (*STANDARD*) NO TORNEAMENTO
DE ACABAMENTO DO AÇO SAE 4140.

por

Alexandre Souza Azambuja

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Co-orientador: Eng. Marcelo Souza de Mello

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Dr. Ivan Guerra Machado

Profa. Dra. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Porto Alegre, junho de 2012.

AGRADECIMENTOS

O mais importante e especial dos agradecimentos é para meus pais, Jorge e Lara, por todos esses anos me educando, amando e suportando; sem eles, com certeza nada disso seria possível.

Ao meu irmão, André, por me incentivar a cursar engenharia e a não desistir nas dificuldades, também pelos puxões de orelha na hora do estudo.

À minha noiva, Fernanda, por todos esses anos de paciência, incentivo e apoio ao longo da faculdade, sem esquecer as correções ortográficas de todos os projetos e trabalhos.

Aos professores, por todo o conhecimento passado e incentivo à curiosidade despertada.

Ao professor André João de Souza, por aceitar o desafio de me orientar neste trabalho, de forma prestativa e muitas vezes entusiasmada.

Aos membros do Laboratório de Usinagem da UFRGS, em especial ao mestrando Marcelo Souza de Mello e ao técnico Guilherme Vargas Schirmer, por auxiliarem e incentivarem a realização deste trabalho.

À Dana Indústrias e à Sandvik Coromant, respectivamente, pelos materiais e ferramentas fornecidos para realização dos ensaios e estudos.

AZAMBUJA, A. S. **Análise comparativa da vida das ferramentas de corte alisadora (*wiper*) e convencional (*standard*) no torneamento de acabamento do aço SAE 4140**. 2012. 21 fls. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Os processos de usinagem de alto desempenho procuram associar os parâmetros ótimos de corte e a máxima taxa de remoção de material com ferramenta mais adequada, controlando o estado da superfície usinada. Neste trabalho, pretendeu-se avaliar de maneira comparativa a vida das ferramentas convencional (*standard*) e alisadora (*wiper*) com raio de quina $r_\epsilon = 0,4$ mm no torneamento de acabamento do aço SAE 4140. Ensaios preliminares (corte a seco) mostraram que a rugosidade média $R_a = (1,99 \pm 0,17)$ μm foi obtida com ferramenta convencional usando velocidade de corte $v_c = 515$ m/min, avanço $f = 0,15$ mm/volta e profundidade de corte $a_p = 0,5$ mm, enquanto que com a ferramenta alisadora, dobrando-se tanto o avanço ($f = 0,30$ mm/volta) quanto a profundidade de corte ($a_p = 1,0$ mm), obteve-se $R_a = (1,67 \pm 0,18)$ μm . A metodologia de análise consistiu de ensaios de vida com os parâmetros supramencionados em que foram feitas medições de rugosidade da peça e de desgastes das ferramentas até que se atingiram valores que pudessem comprometer o desempenho do processo. O tempo decorrido até a falha foi o tempo de vida da ferramenta. Pretendeu-se com isso determinar a viabilidade da aplicação da *wiper* na situação descrita.

PALAVRAS-CHAVE: Torneamento de Acabamento, Ferramentas *Standard* e *Wiper*, Rugosidade da Superfície Usinada.

AZAMBUJA, A. S. **Comparative analysis of the wiper and standard cutting tool-life in finish turning of SAE 4140 steel**. 2012. 21p. Monograph (Undergraduate Final Project in Mechanical Engineering) – Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

The machining processes of high-performance intend to associate the optimal cutting parameters and the maximum material removal rate with the most appropriate tool, controlling the machined surface condition. In this work, is intended to evaluate comparatively the standard and wiper tool lives with a corner radius $r_\epsilon = 0.4$ mm in a dry finish turning of SAE 4140 steel. Preliminary tests indicated that the roughness average $R_a = (1.99 \pm 0.17)$ μm was obtained using standard tool with cutting speed $v_c = 515$ m/min, feed rate $f = 0.15$ mm/rev and depth of cut $a_p = 0.5$ mm; while with the wiper tool, duplicating both feed rate ($f = 0.30$ mm/rev) and depth of cut ($a_p = 1.0$ mm), the result was $R_a = (1.67 \pm 0.18)$ μm . The methodology consist of tool-life tests with the above parameters that be made surface roughness and tool wear measurements until they reach values that may compromise the process performance. The time to failure was the lifetime of the tool. The aim was to determine the viability of the wiper tool application in the described situation.

KEYWORDS: Finish Turning, Standard and Wiper Tools, Surface Roughness.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3.1. Torneamento de Acabamento	1
3.2. Ferramentas Convencional (<i>Standard</i>) e Alisadora (<i>Wiper</i>)	3
3.3. Vida da Ferramenta de Corte	4
3.4. Rugosidade e Acabamento Superficial	6
4. METODOLOGIA.....	7
4.1. Caracterização do Corpo de Prova.....	8
4.2. Propriedades da Ferramenta de Corte.....	9
4.3. Definição dos Parâmetros de Corte	9
4.4. Descrição dos Procedimentos de Medições de Falhas.....	10
5. RESULTADOS E ANÁLISES	10
5.1. Análise da Rugosidade Gerada na Peça	10
5.2. Análise dos Desgastes das Ferramentas.....	13
6. CONCLUSÕES	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14

1. INTRODUÇÃO

O processo de usinagem é reconhecido mundialmente como o mais popular método de fabricação, definido por Ferraresi, 1977, como operações que ao conferir a peça, forma, dimensões, acabamento ou uma combinação dos três itens produza cavaco. Este, por sua vez, é definido como a porção de material retirado pela ferramenta, sendo caracterizado por apresentar forma geométrica irregular. Portanto, é possível afirmar que os processos de usinagem se baseiam na produção através do corte das peças, ou seja, a remoção do excesso de material bruto, possibilitando uma maior variabilidade de formas e detalhes, acabamentos e materiais empregados quando comparados aos demais processos de fabricação.

Apesar de ser um processo popular, o processo é considerado complexo e simples ao mesmo tempo, descrito por Machado *et al.*, 2009, como complexo pela dificuldade de determinar as imprevisíveis condições ideais de corte e simples, pois uma vez que estas são encontradas, o cavaco se forma corretamente dispensando a interferência do operador.

Embora as ferramentas não representem um custo tão elevado, quando comparado ao da peça usinada, os tempos de parada da máquina para troca significam perda de produtividade que, por sua vez, acarreta um custo adicional de produção. Outro fator importante influenciado pelo desgaste são as operações de acabamento, pois estas têm como finalidade obter qualidades superficiais, dimensionais e de geometria da peça.

O presente trabalho baseia-se nos estudos comparativos entre as ferramentas *standard* e *wiper* realizados por Geier *et al.*, 2011, Geier e Souza, 2011 e Mello *et al.*, 2012, e na continuidade desta pesquisa.

Geier *et al.*, 2011 apresentaram inicialmente a relação entre as rugosidades média (R_a) e total (R_t) e a taxa de remoção de material (Q) para as ferramentas citadas, utilizando corpos de prova dos aços, SAE 1020, SAE 1045 e SAE 4140 trefilados a frio.

Em seguida, Geier e Souza, 2011, investigaram o desempenho dessas ferramentas de dois diferentes fabricantes no processo de torneamento de acabamento do aço SAE 4140 para dois raios de ponta ($r_\epsilon = 0,4$ e $0,8$ mm) e quatro avanços ($f = 0,075, 0,15, 0,225$ e $0,3$ mm/volta) em relação aos parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_a/R_t . Verificaram, dentre outras coisas, que para $r_\epsilon = 0,4$ mm e $f = 0,3$ mm/volta foi possível obter superfícies usinadas com valores de $R_a \leq 0,9$ μm para a ferramenta *wiper* e $R_a \cong 2,5$ μm para a ferramenta *standard*.

Depois, Mello *et al.*, 2012, apresentaram equações empíricas que descrevem a textura superficial obtida no torneamento de acabamento do aço, SAE 4140, através dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t a partir de diferentes combinações de avanço f e raio de ponta r_ϵ com vistas a obter a melhor correlação possível em operações de corte para a geração de baixos valores de rugosidade.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar comparativamente o desempenho das ferramentas convencional (*standard*) e alisadora (*wiper*) com $r_\epsilon = 0,4$ mm no torneamento de acabamento a seco do aço SAE 4140, a partir da aquisição direta de valores de rugosidade (peça) e de desgaste (ferramenta de corte) após cada passe de usinagem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Torneamento de Acabamento

No processo de torneamento, a peça gira em torno do eixo principal da máquina, e a ferramenta segue um movimento coplanar com este eixo principal, tendo a finalidade de obter superfícies de revolução através do emprego de uma ou mais ferramentas monocortantes [Ferraresi, 1977]. Devido à simplicidade das formas, para o ensaio de acabamento, é necessária apenas a utilização do torneamento cilíndrico externo do corpo de prova, como mostrado na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Torneamento cilíndrico externo [Sandvik, 2012].

Machado *et al.*, 2009, salienta que essa operação de corte pode ser dividida em desbaste e acabamento. No desbaste não há preocupação com a qualidade superficial, pois a prioridade é a elevada taxa de remoção do material.

O torneamento de acabamento é a operação final, sendo em alguns casos a única operação. A prioridade é a qualidade final da superfície e as tolerâncias dimensionais da peça. Para esta etapa do processo, a combinação de avanço e profundidades de cortes reduzidas com altas velocidades de corte, conforme Diniz *et al.*, 2010, produz uma quantidade razoável de cavaco sem que haja influencia da vibração na remoção do sobremetal da peça.

Thomas, 1982, define como etapas importantes em qualquer processo de usinagem a definição dos parâmetros de entrada, pois quando escolhidos erroneamente, geram falhas na ferramenta como desgaste precoce ou até quebra, além de peças com acabamento impróprio.

A Figura 3.2 resume as relações de entrada e saída associadas ao torneamento. As variáveis de entrada são as independentes, pois pode alterá-las; já as variáveis de saída são as dependentes, pois são influenciadas pelos parâmetros da entrada [Souza, 2011].

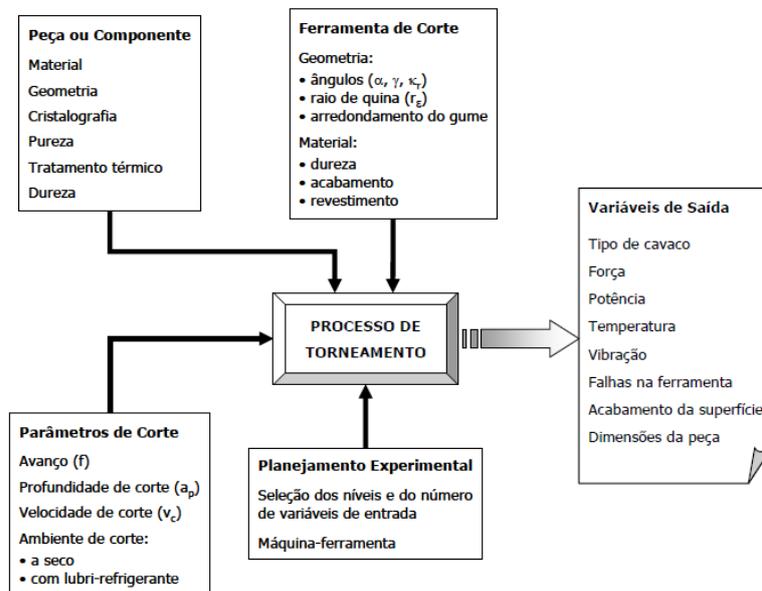


Figura 3.2 – Relações de entradas e saídas no processo de torneamento [Souza, 2011].

A *máquina-ferramenta* restringe a forma e as dimensões do componente fabricado, bem como a produtividade que pode ser alcançada, uma vez que depende da potência disponível e do curso dos eixos. A rigidez é importante, pois afeta a qualidade do corte.

O *material da peça* é dado de projeto. Cada material possui características diferentes de corte. Isso acarreta que os demais parâmetros de usinagem sejam definidos em função dele.

O *material da ferramenta* depende do material a ser usinado e dos parâmetros de corte utilizados. Para Machado, *et al.*, 2009, o material das ferramentas deve aliar alta dureza e tenacidade suficientes para evitar a falha por fadiga, listando os materiais disponíveis para as ferramentas: aço-carbono e aços ligados, aços rápidos, ligas fundidas, metal duro, cermets, cerâmicas e materiais ultraduros (diamantes).

A *geometria da ferramenta* é o conjunto de propriedades geométricas que a define composta por arestas, ângulos, raio de ponta (r_ϵ) etc. As definições destas características estão presentes na norma NBR 6163 [ABNT, 1980]. Machado *et al.*, 2009, explica que as características de formação de cavaco, a durabilidade da ferramenta, a potência exigida e o acabamento superficial são afetadas pela escolha da geometria da ferramenta.

A *velocidade de corte* (v_c) é descrita por Diniz *et al.*, 2010, como a velocidade tangencial instantânea da rotação da ferramenta em torno da peça em operações de torneamento.

O *avanço* (f) é o percurso de avanço em cada volta ou curso da ferramenta [Machado, *et al.*, 2009] e afeta diretamente a formação do cavaco obtido, além da potência de corte necessária. O avanço, juntamente com o raio de ponta, define a rugosidade da superfície obtida na usinagem [Diniz, *et al.*, 2010].

A *profundidade de corte* (a_p) é definido no torneamento longitudinal externo como a grandeza de penetração com que a aresta de corte penetra transversalmente no material. A utilização de grande a_p aumenta a quantidade de metal removido por unidade de tempo, mas em compensação, provoca significativos acréscimos na força e na potência de corte.

A Figura 3.3 mostra a variação da forma do cavaco em função do avanço e da profundidade de corte. Observa-se que a largura b do cavaco é proporcional à profundidade de corte a_p e a espessura h do cavaco é proporcional ao avanço f . A Equação 3.1 mostra esta relação em função do ângulo de posição da ferramenta (χ_r).

$$\text{sen } \chi_r = \frac{a_p}{b} = \frac{h}{f} \quad (3.1)$$

A Figura 3.4 ilustra a relação entre o raio de ponta (r_ϵ) e a profundidade de corte (a_p). Uma relação a_p/r_ϵ pequena promove uma curvatura lateral, afastando o cavaco da superfície usinada; já uma relação a_p/r_ϵ grande gera uma curvatura lateral somada a uma vertical, fazendo com que o cavaco vá de encontro à superfície de folga da ferramenta.

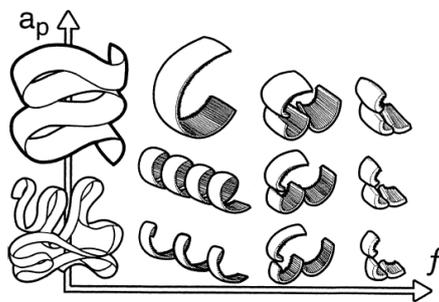


Figura 3.3 – Forma do cavaco em função de f e a_p

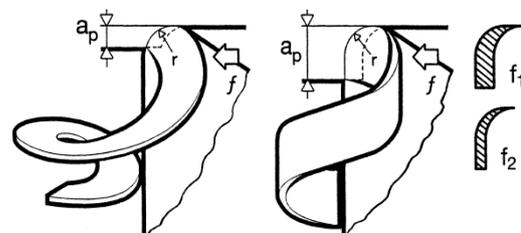


Figura 3.4 – Relação a_p/r_ϵ

3.2. Ferramentas Convencional (*Standard*) e Alisadora (*Wiper*)

O aumento do raio de ponta da ferramenta a torna mais resistente, porém acarreta aumento da vibração devido ao maior atrito causado pela maior área de contato entre peça e ferramenta. O acabamento da superfície depende muito da relação entre avanço (f) e raio de ponta (r_ϵ). Por sua vez, esta relação contribui diretamente para a rugosidade da peça, podendo ser descritas pela Equação 3.2, sendo este o menor valor de rugosidade possível no processo de torneamento [Diniz *et al.*, 2010; Machado *et al.*, 2009; Kalpakjian e Schmid, 2010].

$$R_t = \frac{1000 f^2}{8 r_\epsilon} = 125 \frac{f^2}{r_\epsilon} \quad (3.2)$$

Uma pastilha convencional tem raio de ponta único (Figura 3.5), que pode variar de 0,1 a 2,4 mm. Além disso, a rugosidade está diretamente relacionada ao avanço utilizado.

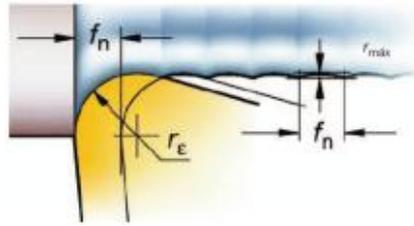


Figura 3.5 – Geometria da ferramenta convencional (*Standard*) [Sandvik, 2012].

Os insertos *wiper* são pastilhas de alta produtividade usadas em operações de semiacabamento e acabamento em usinagem. Podem ser aplicadas em torneamento com altas taxas de avanço, sem perder a capacidade de gerar bom acabamento superficial, nem a capacidade de quebrar cavacos [Sandvik, 2012]. Estas ferramentas possuem uma alteração na geometria, mais especificamente no raio de ponta (Figura 3.6a), de modo que o *avanço* (f) e a *profundidade de corte* (a_p) possam ser o dobro do usado nas ferramentas convencionais sem depreciar o acabamento superficial da peça.

De acordo com o Sandvik, 2012, o raio de ponta em uma pastilha alisadora (*wiper*) tem sua construção utilizando de 3 a 9 raios diferentes. Isso aumenta o comprimento de contato das pastilhas e o efeito das faixas de avanço ou a superfície de um modo positivo.

Segundo estudo comparativo realizado por Grzesik e Wanat, 2006, sobre o acabamento gerado em processos de torneamento de materiais endurecidos, as superfícies usinadas apresentam valores similares de rugosidade para ambas as geometrias de ferramenta quando utilizado avanço para *standard* de 0,10 mm/volta e de 0,20 mm/volta para *wiper*. A Figura 3.6b mostra a comparação da rugosidade quando utilizadas as duas ferramentas.

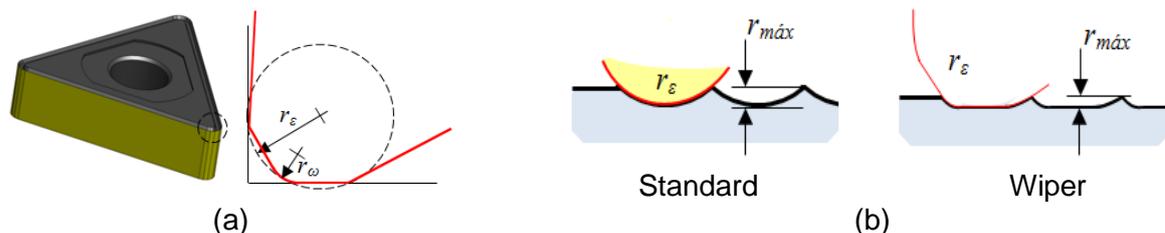


Figura 3.6 – Geometria da ferramenta: (a) raios (r_ϵ e r_ω) e faces planas na ponta do inserto *wiper*, (b) comparação entre as geometrias *standard* e *wiper* [Mello, *et al.*, 2012].

3.3. Vida da Ferramenta de Corte

A vida de uma ferramenta de corte é medida pelo tempo no qual ela efetivamente trabalha entre duas afiações sucessivas ou a troca da aresta de corte do inserto. Machado *et al.*, 2009, diz que por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas e por menor que seja a resistência mecânica da peça, a ferramenta de corte sempre sofrerá desgaste e precisará ser substituída. Isso ocorre, pois durante o processo de usinagem, a ferramenta é exposta a uma combinação de vários fatores de origem abrasiva, mecânica, química e térmica. Como tanto o material da peça como o da ferramenta de corte não são homogêneos, os desgastes e as avarias podem ser observados na ferramenta durante o uso.

Diniz *et al.*, 2010, define quatro fatores para o fim de vida das ferramentas de corte:

- Quando o desgaste é tão elevado que se receia a quebra da aresta de corte, sendo mais crítico em operações de desbaste.
- Quando não é mais possível conseguir tolerâncias apertadas ou acabamento superficial na peça, devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta.
- O desgaste eleva-se muito, fazendo a temperatura da aresta ultrapassar a temperatura na qual a ferramenta perde o fio, sendo mais crítico em ferramentas de aço rápido que suportam temperaturas menores.
- Ocorre aumento da força de usinagem que interfere no funcionamento da máquina.

Machado, *et al.*, 2009, aponta três fenômenos como responsáveis pela perda da eficiência das ferramentas de corte: *desgaste*, *avaria* e *deformação plástica*.

O *desgaste* é definido pela norma ISO 3685, 1993, como a mudança da forma original da ferramenta durante o corte, resultante da perda gradual de material. A progressão do desgaste apresenta-se como uma falha contínua e progressiva e em proporções pequenas, podendo ocorrer por vários mecanismos entre os quais a deformação plástica. Por ser um processo contínuo, o comportamento do desgaste pode ser modelado matematicamente ao longo do seu progresso, até o dano completo da ferramenta [Machado *et al.*, 2009].

As *avarias* são falhas transitórias que ocorrem de forma aleatória e inesperada, levando a ferramenta ao colapso, através da quebra, lascamento ou perda de considerável de material da aresta de corte, sendo detectadas apenas após ocorrerem, sendo subdivididas em: deformações plásticas, trincas e fraturas.

A *deformação plástica* é, segundo Machado, *et al.*, 2009, a mudança da geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material, sendo causada pelas altas tensões cisalhantes que ocorrem na superfície da ferramenta de corte. Trent e Wright, 2000, dizem que a deformação plástica pode ser tratada como desgaste, uma vez que ambas promovem mudanças na geometria da ferramenta podendo causar a destruição da aresta de corte.

Além do desgaste, o atrito e a deformação plástica causados no processo resultam altas temperaturas na região de corte, ocasionando uma diminuição da resistência ao desgaste da ferramenta. Com isso, a aresta da ferramenta tem sua capacidade de corte reduzida, fazendo a força de usinagem aumentar. Esse aumento da força de corte produz um incremento da temperatura na região, tornando o desgaste mais acelerado.

A Figura 3.7 mostra os tipos de desgastes e comumente encontrados em ferramentas de corte segundo a norma ISO 3685, 1993.

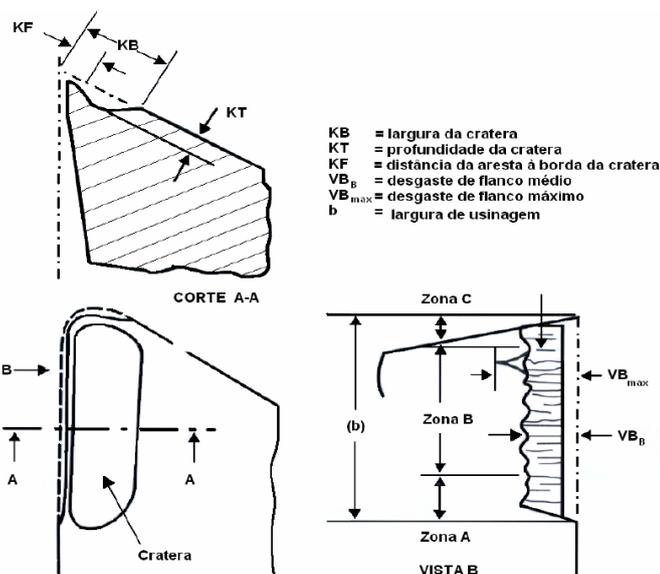


Figura 3.7 – Tipos de desgaste para ferramentas de corte [adaptado de ISO 3685,1993].

Os parâmetros de maior influência na progressão do desgaste são a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte, respectivamente nessa ordem. Assim, conforme Diniz *et al.*, 2010, o impacto na vida da ferramenta causado por um acréscimo de 10% na velocidade de corte é muito maior do que ocorreria, se o avanço fosse alterado na mesma proporção. Isso ocorre, pois quanto maior a velocidade de corte, maior o calor entregue ao processo, sem acrescer área. Já quando aumentado o avanço, aumenta-se a quantidade de calor, porém aumentando a área da ferramenta que o recebe.

Conforme Diniz *et al.*, 2010, nas operações de acabamento, o desgaste frontal é maior que o de cratera, aumentando progressivamente até a quebra da cunha cortante. Para Ferraresi, 1977, em acabamento, a ferramenta deve ser substituída antes de atingir valores que possam originar quebra da aresta de corte, pois esta, não terá condições de satisfazer as exigências impostas de tolerâncias dimensionais e de acabamento de superfície da peça.

Nas ferramentas de metal duro com cobertura segundo Diniz *et al.*, 2010, o desgaste de flanco cresce lentamente em virtude da alta resistência ao desgaste das camadas de cobertura da ferramenta até atingir valores de desgaste de flanco V_B na ordem de 0,3 a 0,4 mm, enquanto o desgaste de cratera é muito pequeno ou inexistente.

Após o desgaste das camadas de cobertura, Diniz *et al.*, 2010 explica que o corte passa a ser realizado pelo substrato da ferramenta, que possui menor resistência ao desgaste fazendo o desgaste de flanco crescer mais rapidamente, atingindo valores de V_B da ordem de 0,8 a 1,0 mm num tempo muito curto.

3.4. Rugosidade e Acabamento Superficial

O estudo do acabamento superficial torna-se importante nos casos em que se exige uma precisão no ajuste entre peças unidas, e naqueles em que as precisões dimensional e de forma não são satisfatórias para garantir a funcionalidade do conjunto.

Segundo Mesquita, 1992, o objetivo do processo de usinagem é obter uma superfície que apresente fatores superficiais (textura) e subsuperficiais (integridade) apropriados, a fim de garantir segurança, confiabilidade e longa vida ao componente fabricado.

Quando analisadas em detalhes, as superfícies usinadas das peças exibem irregularidades formadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre tal superfície. Segundo Machado, *et al.*, 2009, a rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou erros microgeométricos que são resultantes do processo de corte.

A rugosidade gerada na usinagem é mais influenciada pelo processo que pela máquina. Conforme Machado *et al.*, 2009, os fatores que podem contribuir com a rugosidade gerada são: marcas da quina da ferramenta ou de fragmentos da mesma, as quais podem apresentar natureza periódica para alguns processos e aleatória para outros; geração de rebarba do material durante a operação de corte; restos de aresta postiça de corte de uma ferramenta na superfície usinada; forma geométrica do quebra-cavaco na quina da ferramenta.

Dentre outros, os parâmetros utilizados no presente trabalho para avaliar a textura da superfície usinada são a *rugosidade média* R_a e a *rugosidade total* R_t .

- *Rugosidade Média* (R_a) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dentro do percurso de medição L , demonstrada na Figura 3.8 e calculada pela Equação 3.3:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |P(x)| dx \Rightarrow R_a \cong \frac{1000 f^2}{18\sqrt{3} r_\epsilon} = 32,075 \frac{f^2}{r_\epsilon} \quad (3.3)$$

- *Rugosidade total* (R_t) é a maior altura de pico e a maior profundidade de vale do perfil dentro do percurso de medição (Fig. 3.8).

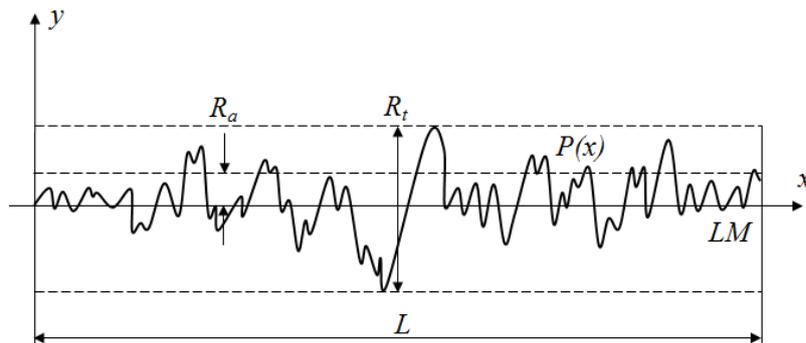


Figura 3.8 – Rugosidades R_a e R_t em um perfil de superfície $P(x)$ de uma amostra de comprimento L [Mello *et al.*, 2012].

Mello *et al.*, 2012, determinaram empiricamente as Equações 3.4 e 3.5 para calcular, respectivamente, a rugosidade média R_a [μm] e a rugosidade total R_t [μm] para a ferramenta *wiper*, com f [mm/volta] e r_ϵ [mm].

$$R_a = 0,520 + 3,56 \cdot \left(\frac{r_\varepsilon}{f} \right)^{-2,12} \quad (3.4)$$

$$R_t = \frac{0,667}{f} + 282 \cdot f^{\left[4,40 - \frac{0,664}{r_\varepsilon} \right]} \quad (3.5)$$

Cada processo garante uma precisão sob determinadas condições de usinagem. Na Tabela 3.1, Álvares, 2001, mostra a classe de tolerância (IT) e a rugosidade média (R_a) que podem ser obtidas por torneamento e retificação na usinagem de superfície cilíndrica externa.

Tabela 3.1 - Precisão e acabamento superficial obtidos nos processos de torneamento e retificação de uma superfície cilíndrica externa [Álvares, 2001].

Processo	Operação	Classe de Tolerância (IT)	Rugosidade R_a [μm]
Torneamento	Desbaste	12 – 13	10 – 80
	Semiacabamento	10 – 11	2,5 – 10
	Acabamento	07 – 09	1,25 – 2,5
	Ultraprecisão	05 – 06	0,80 - 1,25
Retificação	Desbaste	07 – 09	0,63 – 0,80
	Semiacabamento	06 – 07	0,16 – 0,63
	Acabamento	05 – 06	0,08 – 0,16

4. METODOLOGIA

O procedimento experimental consistiu basicamente em ensaios de longa duração aplicando ferramentas convencionais e alisadoras no torneamento de acabamento a seco em corpos de prova de aço SAE 4140. Foram realizados cortes longitudinais externos utilizando o torno CNC Mazak QTN 100-II (Figura 4.1). Medições periódicas do desgaste da ferramenta e da rugosidade da superfície usinada foram realizadas e os valores devidamente registrados.



(a)



(b)

Figura 4.1 – (a) Torno CNC Mazak modelo QTN 100-II; (b) Corpo de prova fixado para realização da operação de corte.

Nos itens que se seguem, serão descritos os materiais e os métodos relacionados com o desenvolvimento da parte prática deste Trabalho de Conclusão de Curso:

- Caracterização do corpo de prova (material e geometria).
- Propriedades da ferramenta de corte (convencional e alisadora).
- Definição dos parâmetros de corte (principalmente f e a_p).
- Descrição dos procedimentos de medições de falhas (desgaste e rugosidade).

4.1. Caracterização do Corpo de Prova

O aço SAE 4140 é considerado um aço de médio carbono, possui 0,40% de carbono, apresenta características de alta temperabilidade, má soldabilidade e usinabilidade razoável, além de boa resistência à torção e à fadiga. Possui baixa dureza e resistência à tração, porém excelente resistência ao choque e elevado alongamento e *perita* lamelar que é responsável pela dureza do material e apresenta uma resistência à tração superior à *ferrita*, porém possui menor ductilidade. É empregado em peças que exigem elevada dureza, resistência e tenacidade, sendo assim, muito utilizado pela indústria automotiva. Conforme Chiaverini, 2008, possui melhor usinabilidade com estrutura perlítica lamelar e esferoidita grosseira.

Para os ensaios deste trabalho foi utilizado o SAE 4140 laminado a quente, por ser um aço amplamente usado pela indústria e que apresenta características metalúrgicas as quais propiciam o desgaste prematuro das ferramentas de corte. A sua composição química é apresentada na Tabela 4.1, conforme a norma SAE-J404 [Gerdau, 2003].

Tabela 4.1 – Composição química do aço SAE 4140 [Gerdau, 2003]

% C	% Mn	% P (Máx)	% S (Máx)	% Cr	% Mo	% Si
0,38 – 0,43	0,75 – 1,00	0,030	0,040	0,80 – 1,10	0,15 – 0,25	0,15 – 0,35

Com o objetivo de verificar a homogeneidade do aço, foi realizado ensaio de dureza Brinell, utilizando um durômetro Reicherter D7306, encontrando-se o valor médio de 260 HB. O valor para tensão de escoamento ($\sigma_{esc} = 200$ MPa) foi retirado de Matweb, 2012.

Outro fator metalúrgico que tem grande influência na usinabilidade é a microestrutura. A Figura 4.2 mostra a do material usado no trabalho vista pelo microscópio Pantec MMI 200, com ampliação 200x e ataque em *Nital* 5%. Foi observada no núcleo a presença de perlita e em menor quantidade *ferrita* com estrutura de grãos poligonais. Na periferia, observou-se a ocorrência de descarbonetação originada no processo de laminação a quente.

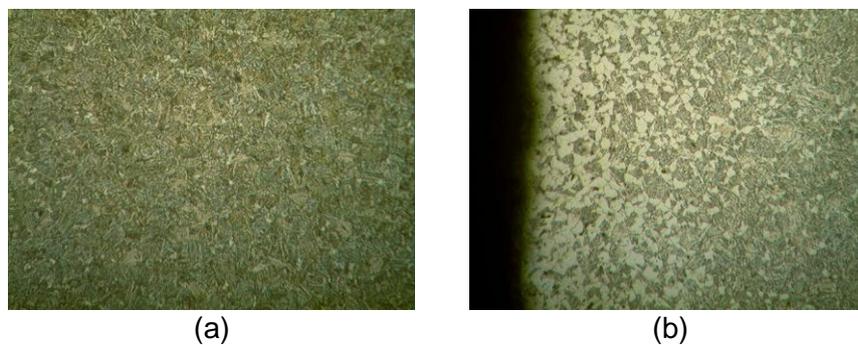


Figura 4.2 – Microestrutura do aço SAE 4140 utilizado no ensaio, com ampliação 200x: (a) núcleo; (b) periferia.

Já as dimensões do corpo de prova são indicadas na Figura 4.3.

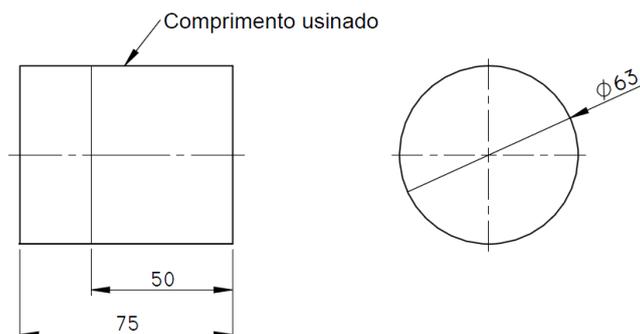


Figura 4.3 – Dimensões do corpo de prova de aço SAE 4140 (em milímetros).

Para obter as dimensões da Figura 4.3, as peças – inicialmente com diâmetro de 65 mm e comprimento cerca de 80 mm – foram preparadas em torno convencional efetuando a remoção da carepa (corte longitudinal), o faceamento (corte radial) e o furo de centro para a fixação no torno CNC entre placa e ponto.

4.2. Propriedades da Ferramenta de Corte

Nos experimentos foram usados insertos Sandvik Coromant com formato triangular básico negativo (T-Max P), raio de ponta $r_\epsilon = 0,4$ mm e quebra-cavacos para torneamento de acabamento (PF e WF), além de cobertura MTCVD (do inglês *Medium Temperature Chemical Vapor Deposition*) de TiCN/Al₂O₃/TiN (GC4215) (Figura 4.4).



Figura 4.4 – Insetos utilizados: (a) convencional (*Standard*); (b) alisadora (*Wiper*).

O sistema de fixação do inserto no suporte é do tipo cunha-grampo para minimizar as vibrações. O porta-ferramentas MTJNL 2020K utilizado possui ângulo de posição $\chi_r = 93^\circ$.

A Tabela 4.2 mostra as especificações recomendadas pelo fabricante [Sandvik, 2012] para os insertos *standard* e *wiper* para definir os parâmetros de máquina (*velocidade de corte* v_c , *avanço* f e *profundidade de corte* a_p) utilizados nos experimentos.

Tabela 4.2 – Especificações das ferramentas utilizadas [Sandvik, 2012].

Porta Ferramenta	Inserto	Especificação ISO	Parâmetros Recomendados	
			Parâmetros	Intervalos de Uso
MTJNL 2020K 16M1	<i>standard</i>	TNMG16 04 04 PF 4215	v_c [m/min]	(415 – 575)
			f [mm/volta]	(0,07 – 0,30)
			a_p [mm]	(0,25 – 1,50)
	<i>wiper</i>	TNMX 16 04 04 WF 4215	v_c [m/min]	(415 – 570)
f [mm/volta]			(0,08 – 0,30)	
a_p [mm]			(0,20 – 3,00)	

4.3. Definição dos Parâmetros de Corte

Para as geometrias *standard* (S) e *wiper* (W) realizaram-se dois ensaios de longa duração em torneamento no torno CNC empregando-se os mesmos parâmetros (Tab. 4.3).

Tabela 4.3 – Parâmetros de Corte Utilizados.

Ensaio	v_c [m/min]	f [mm/volta]	a_p [mm]
S1 e W1	515	0,15	0,5
S2 e W2	515	0,30	1,0

A velocidade de corte foi mantida constante ($v_c = 515$ m/min). Nos ensaios S1 e W1, os parâmetros usados foram $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 0,5$ mm. Nos ensaios S2 e W2, utilizaram-se os dobros do avanço ($f = 0,30$ mm/volta) e da profundidade de corte ($a_p = 1,0$ mm) para ambos.

4.4. Descrição dos Procedimentos de Medições de Falhas

No decorrer do processo para as quatro situações, o inserto utilizado e a peça usinada foram supervisionados constantemente através da medição periódica (a cada passe da ferramenta, que corresponde ao comprimento usinado de 50 mm) a fim de avaliar os desgastes e/ou avarias na ferramenta de corte e de rugosidades (R_a e R_t) na superfície do corpo de prova.

Para examinar a falha da ferramenta por desgastes, foi utilizado o microscópio digital USB Dino-Lite modelo AM-413ZT, com resolução de 1024 x 768 e ampliação de 55x (Fig. 4.5). Para a realização da medição de desgastes na ferramenta, o inserto foi retirado da porta-ferramenta (fixado na máquina-ferramenta) e colocado em um suporte projetado e fabricado para posicioná-lo sempre na mesma posição, com objetivo de adquirir imagens e realizar as medições com auxílio de um software dedicado.



Figura 4.5 – (a) Microscópio Dino-Lite modelo AM-413ZT; (b) interface do software dedicado para aquisição das imagens.

Já a medição de rugosidade da superfície do corpo de prova foi feita através do rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201 com resolução de 0,01 μm (Fig. 4.6a). Para a realização da medição, o corpo de prova também é removido do torno CNC e fixado em uma base magnética para a realização da leitura dos valores de rugosidade (Fig. 4.6b). As leituras foram retiradas em três planos defasados entre si de 120°.

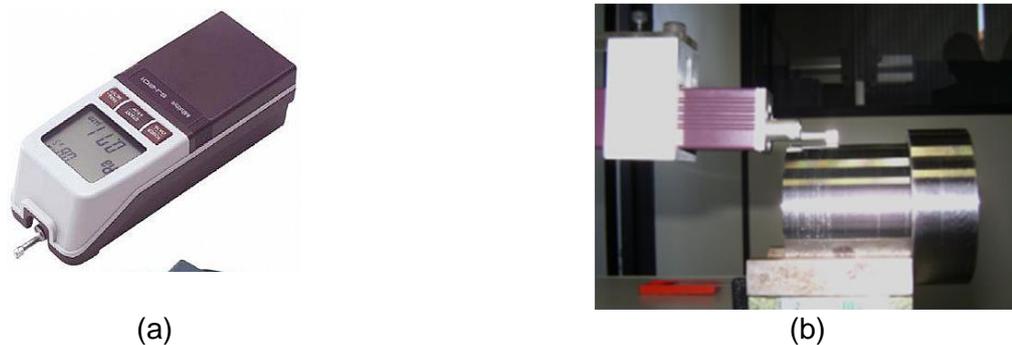


Figura 4.6 – (a) Rugosímetro Mitutoyo SJ-201; (b) rugosímetro em operação.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados obtidos no torneamento com as ferramentas convencional (*standard*) e alisadora (*wiper*) foram avaliados de forma comparativa sob dois aspectos: análise da rugosidade gerada na peça; e análise dos desgastes das ferramentas.

5.1. Análise da Rugosidade Gerada na Peça

A primeira análise realizada foi em relação ao acabamento superficial da peça usinada, mais especificamente a rugosidade média (R_a). A Figura 5.1 mostra os gráficos das rugosidades médias obtidas nos Ensaios S1/W1 e S2/W2.

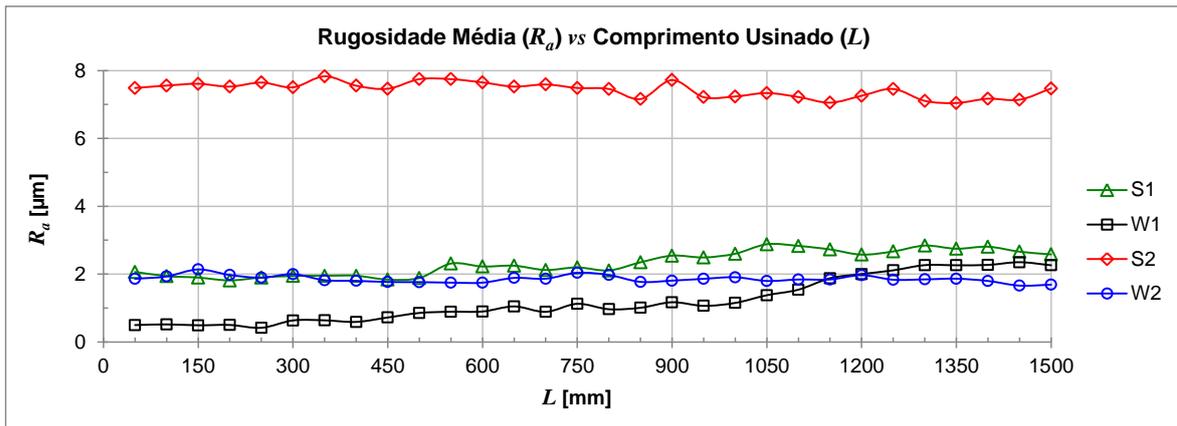


Figura 5.1 – Comparativo da rugosidade média entre as ferramentas *standard* e *wiper* para os parâmetros da Tabela 4.3.

A tendência normal de um ensaio de vida de ferramenta é que, conforme o uso do inserto, o acabamento da superfície usinada da peça piore, ou seja, a rugosidade aumente. É possível visualizar essa tendência nos gráficos de S1 e W1 da Figura 5.1. No entanto, apesar do comprovado aumento do desgaste da ferramenta com o proceder dos passes (vide Figura 5.5, item 5.2), este comportamento não pôde ser observado pelos gráficos de S2 e W2.

Uma possível explicação para este fato está na geometria do cavaco gerado: menores valores de f e a_p (Situação “1”) fazem com que o cavaco seja mais largo e menos espesso e, portanto, mais difícil de se quebrar. Com o desgaste da ferramenta, a geometria da aresta de corte é modificada. Como este cavaco se quebra com mais dificuldade e a aresta desgastada modifica o enrolamento do cavaco, este se volta para a peça e é esmagado pela ferramenta de corte, prejudicando o acabamento da superfície usinada. Assim, a rugosidade aumenta com o aumento do desgaste. Para a Situação “2”, mesmo com maiores valores de desgaste, isto não se verifica, pois o cavaco é menos largo e mais espesso e, por isso, mais fácil de quebrar.

Outra explicação menos provável seria a relação entre raio de ponta e a profundidade de corte ilustrada pela Figura 3.4. Verifica-se que uma relação $a_p/r_\epsilon = 1,25$ (pequena – Situação “1”) pode promover uma curvatura lateral do cavaco, afastando-o da superfície usinada, enquanto que uma relação $a_p/r_\epsilon = 2,5$ (grande – Situação “2”) pode gerar uma curvatura lateral somada a uma curvatura vertical, fazendo com que o cavaco vá de encontro à superfície de folga da ferramenta, prejudicando o acabamento.

Ainda com relação aos gráficos da Figura 5.1, pode-se observar para ambas as ferramentas um aumento dos valores de rugosidade da Situação “1” para a Situação “2”, por motivos óbvios (a rugosidade é proporcional ao quadrado do avanço).

Já com relação às classes de tolerância e valores de rugosidade média R_a , duas situações distintas são observadas:

1. Com uma confiança de 95%, os valores de rugosidade encontrados para as situações W1 [$R_a = (1,21 \pm 0,24) \mu\text{m}$], W2 [$R_a = (1,86 \pm 0,04) \mu\text{m}$] e S1 [$R_a = (2,32 \pm 0,13) \mu\text{m}$] no comprimento usinado de 1500 mm refletem uma situação de acabamento em torneamento, mencionada na Tabela 3.1, mostrando que a textura obtida é compatível com a classificação estabelecida.
2. O valor de rugosidade encontrado para a situação S2 [$R_a = (7,43 \pm 0,08) \mu\text{m}$, 95% de confiança] no comprimento usinado de 1500 mm cogita uma situação de semiacabamento em torneamento, mencionada na Tabela 3.1, indicando que a textura obtida não é compatível com a denominação PF (*finish*) da ferramenta TNMG.

De acordo com Sandvik, 2012, as ferramentas *wiper* foram projetadas para operar com o dobro dos valores de *avanço* (f) e *profundidade de corte* (a_p) usados nas ferramentas *standard*, sem depreciar o acabamento superficial da peça. Esta tendência pôde ser observada durante os ensaios e pode ser vista na Figura 5.1, onde o ensaio com os parâmetros dobrados da *wiper* (W2) apresenta desempenho similar ao da ferramenta *standard* (S1).

Em componentes que exijam menor responsabilidade, a medição da rugosidade média R_a pode ser a única a ser considerada. Porém, ao utilizar valores médios, podem-se esconder diferenças grandes entre picos e vales que, em algumas condições, podem levar ao colapso do componente usinado. Para evitar este problema, a medição da rugosidade total R_t mostra-se importante, pois não se restringe à amostra dos valores. A Figura 5.2 mostra os gráficos das rugosidades totais obtidas nos Ensaios S1/W1 e S2/W2 em que se verificam comportamentos similares às curvas da Figura 5.1. Desta forma, as prováveis explicações são as mesmas.

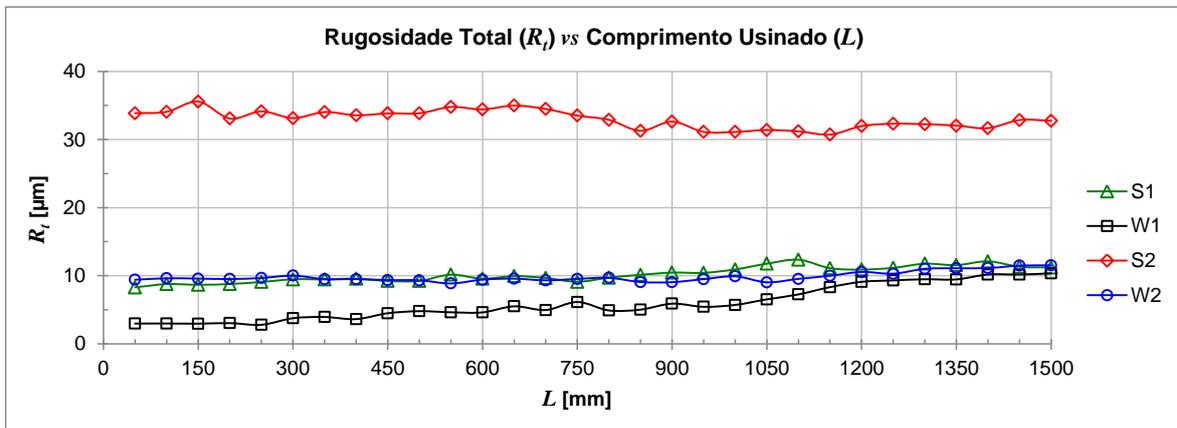


Figura 5.2 – Comparativo da rugosidade total entre as ferramentas *standard* e *wiper* para os parâmetros da Tabela 4.3.

Geier e Souza, 2011, mostraram através de Análise de Variância que a variação da geometria da ferramenta tem efeito significativo sobre a relação entre a rugosidade média e a total da superfície usinada. Assim, a Figura 5.3 ilustra os gráficos das relações entre as rugosidades média e total obtidas nos Ensaios S1/W1 e S2/W2.

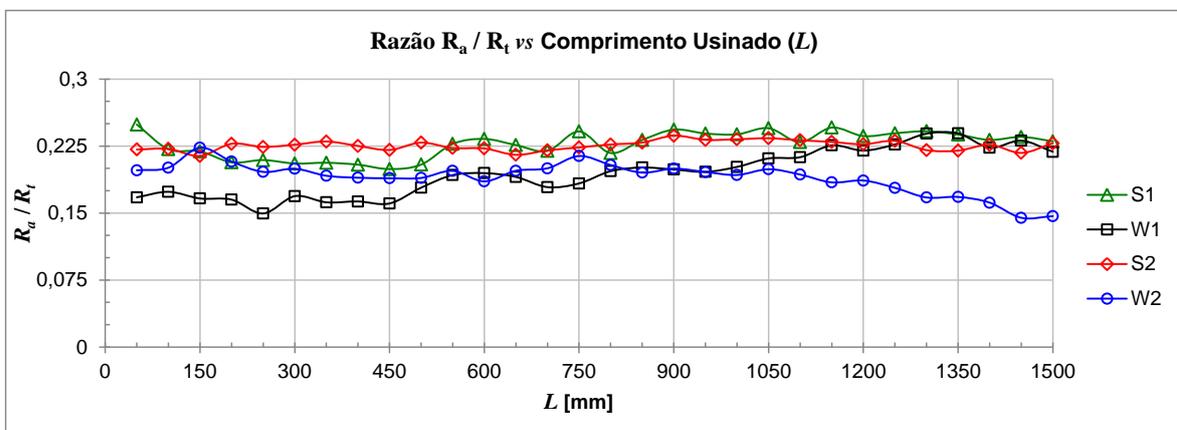


Figura 5.3 – Comparativo da relação R_a/R_t entre as ferramentas *standard* e *wiper* para os parâmetros da Tabela 4.3.

Pode-se observar na Figura 5.3 que a relação entre as rugosidades média e total se mantém relativamente estável para a geometria *standard* (S1 e S2), ou seja, não há aumento ou diminuição significativa do valor de R_a/R_t ao longo do comprimento usinado L . Já para a geometria *wiper*, observa-se para W1 um aumento da relação com o aumento de L e para W2 uma diminuição. Isto pode mostrar que a alteração da relação R_a/R_t com o desgaste da ferramenta (vide Figura 5.5) é mais sensível com a utilização de ferramenta alisadora.

Mello *et al.*, 2012, determinaram empiricamente equações de superfície para estimar os valores de R_a e R_t . De modo a comprovar a eficácia destas estimativas, a Figura 5.4 ilustra os valores obtidos experimentalmente e os calculados pelas Equações 3.3 e 3.2 (geometria *standard*) e pelas Equações 3.4 e 3.5 (geometria *wiper*).

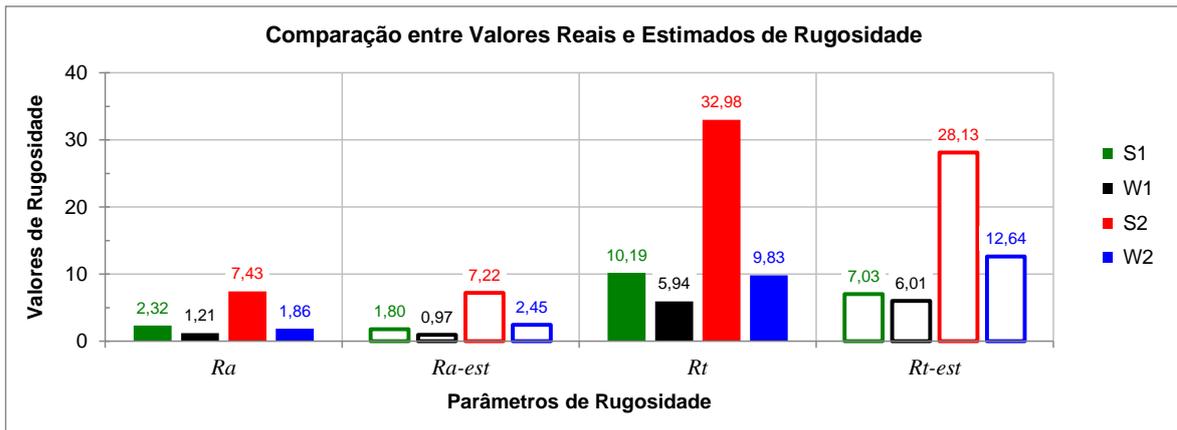


Figura 5.4 – Comparativo dos valores experimentais (R_a e R_t) e teóricos (R_{a-est} e R_{t-est}) entre as ferramentas *standard* e *wiper* para os parâmetros da Tabela 4.3.

Considerando diferentes classes de rugosidade conforme Kalpakjian e Schmid, 2010, $N7 = (1,2 \pm 0,4) \mu\text{m}$, $N8 = (2,4 \pm 0,8) \mu\text{m}$ e $N10 = (9,4 \pm 3,1) \mu\text{m}$, os valores estimados e reais de rugosidade média R_a nos Ensaios S1/W1 e S2/W2 encontram-se dentro da faixa delimitada pelos valores limítrofes, respectivamente, em N8, N7, N10 e N8, mostrando que a estimativa é satisfatória. Além disso, de acordo com Álvares, 2001, os mesmos valores estimados e reais (médios) encontram-se na mesma faixa de classificação de operação, respectivamente, acabamento, ultraprecisão, semiacabamento e acabamento.

5.2. Análise dos Desgastes das Ferramentas

O bom desempenho em relação ao acabamento da superfície usinada gerado pela geometria *wiper* frente à *standard* deve-se a influência da geometria de r_ϵ de cada ferramenta. A ferramenta alisadora, por apresentar uma composição com vários raios menores, possibilita uma maior área de contato entre ferramenta e peça, permitindo a geometria *wiper* trabalhar com valores de f e a_p 100% maiores em relação à convencional, proporcionando uma maior taxa de remoção de material sem perda de desempenho no acabamento. Porém, conforme Sandvik, 2012, esta mesma geometria que possibilita à ferramenta alisadora um melhor desempenho de acabamento, ocasiona um maior desgaste da ferramenta.

Entretanto, no ensaio realizado, esta informação não foi confirmada, uma vez que, apesar de manter a tendência de aumento do desgaste no decorrer do ensaio, as ferramentas alisadoras sempre mantiveram valores de desgaste de quina VB_C inferiores aos das ferramentas convencionais, como mostrado na Figura 5.5.

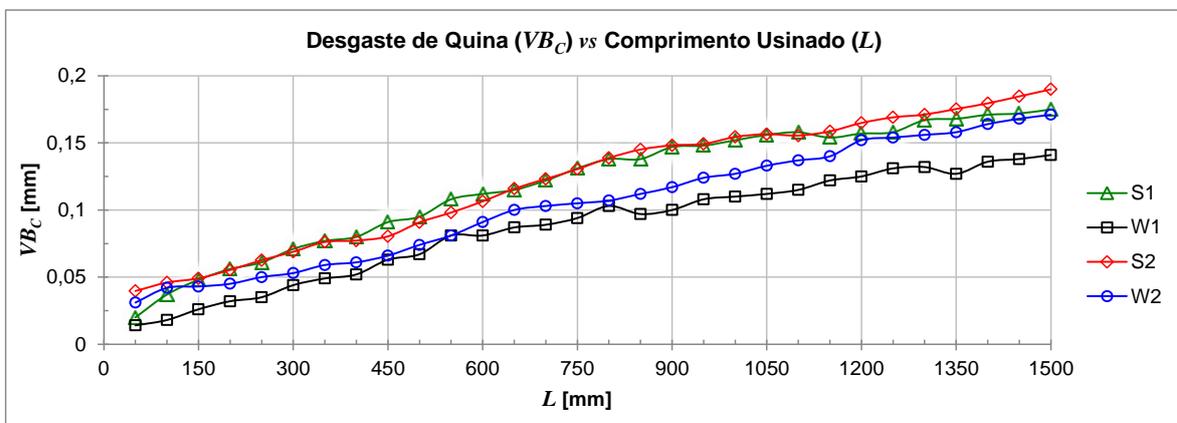


Figura 5.5 – Comparativo do desgaste de quina VB_C entre as ferramentas *standard* e *wiper* para os parâmetros da Tabela 4.3.

Comparando as medições da rugosidade média com o desgaste da ferramenta, nota-se que as maiores variações lidas entre um passe e outro para os valores da rugosidade coincidem com os saltos da medição do desgaste, comprovando que este influencia diretamente no acabamento superficial da peça usinada. A Figura 5.6 mostra os insertos das duas geometrias (convencional e alisadora) novas e os respectivos desgastes das ferramentas após 1300 mm usinados (26 passes) nos Ensaio S1/W1 e S2/W2.

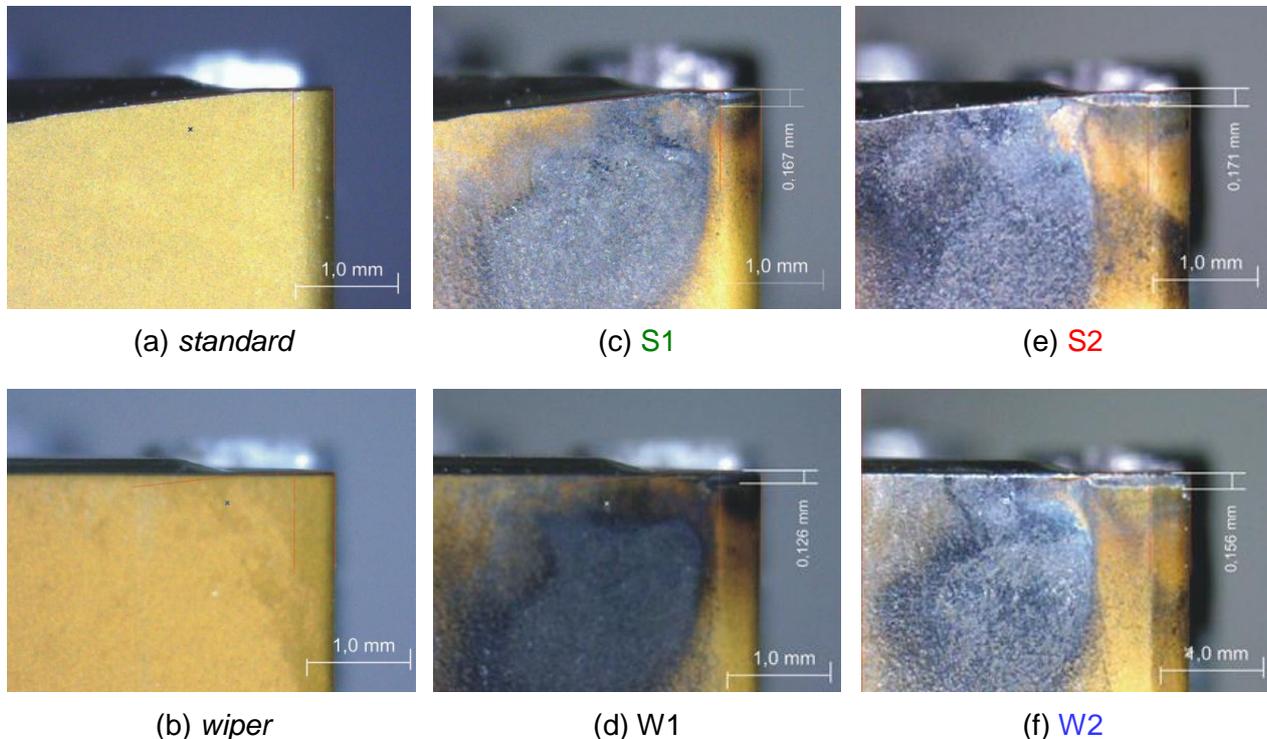


Figura 5.6 – Ferramentas: (a) convencional nova; (b) alisadora nova; (c) ferramenta S1; (d) ferramenta W1; (e) ferramenta S2; e (f) ferramenta W2.

6. CONCLUSÕES

Tendo em vista que os custos das ferramentas alisadoras e convencionais (*standard*) são iguais, conclui-se que a utilização da ferramenta alisadora (*wiper*) é economicamente viável, mesmo quando utilizada em condições fora das recomendadas pelo fabricante. Isto vale tanto do ponto de vista do acabamento superficial gerado quanto da vida da ferramenta, que apresenta resultados muito similares quando comparado ao do inserto *standard*.

Utilizando ambas as ferramentas nas condições consideradas ideais pelo fabricante, as duas apresentam bom desempenho, tanto do ponto de vista do acabamento superficial como no desgaste do inserto. Porém, novamente, destaque para a geometria *wiper*, por promover uma taxa de remoção de material 4x maior com o mesmo acabamento, possibilitando redução do tempo e do custo de usinagem. Isto foi constatado pelos Ensaio S1 e W2.

Até o ponto onde os ensaios foram executados, constatou-se que ocorre um aumento da rugosidade relacionada ao aumento do desgaste na quina da ferramenta para S1 e W1. Este afeta as duas geometrias de forma similar (alteração da aresta de corte e dobramento do cavaco), não podendo ser considerado o fator primordial na decisão da escolha do padrão de inserto de usinagem. Já para S2 e W2, isto não pode ser efetivamente constatado, visto a uniformidade da rugosidade ao longo do comprimento usinado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas); “NBR 6163 – Conceitos da técnica de usinagem: geometria da cunha cortante: terminologia”, São Paulo, 1980.

Álvares, J. A.; **“Estudo dirigido: métodos para projeto, planejamento do processo e fabricação de peças assistidos por computador”**, 2001, Disponível em: <www.graco.unb.br/alvares/estudo_dirigido/Planejamento_de_Processo>. Acesso em 23 mai. 2012.

Chiaverini, V.; **“Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos”**, 7. ed., São Paulo: ABM, 2008, 599p.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. **“Tecnologia da usinagem dos materiais”**, 7.ed., São Paulo: Artiber, 2010, 262p.

Ferraresi, D.; **“Fundamentos da usinagem dos metais”**, São Paulo: Edgar Blücher, 1977, 800p.

Geier, M.; Mello, M. S.; Souza, A. J.; **“Comparação entre ferramenta alisadora e ferramenta convencional no torneamento de acabamento para aços baixo carbono e baixa liga”**. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (Anais do VI COBEF), 11-15 Abr., Caxias do Sul, RS, 2011.

Geier, M.; Souza, A. J.; **“Assessment of surface roughness in dry finish turning operations of AISI 4140 steel using wiper cutting tools”**. 21st International Congress of Mechanical Engineering (XXI COBEM Annals), Oct. 24-28, Natal, RN, 2011.

Gerdau, **“Manual de aços”**, Gerdau Aços Finos Piratini, 2003. Disponível em: www.dem.feis.unesp.br/maprotec/educ/lmcm1/catalogo_acos_gerdau.pdf.

Grzesik, W., Wanat, T., **“Surface Finish Generated in Hard Turning of Quenched Alloy Steel Parts Using Conventional and Wiper Ceramic Inserts”**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 15, pp. 1988-1995, 2006.

ISO 3685, **“Tool-life testing with single-point turning tools”**, International Organization for Standardization, 2^a ed., 1993, 48p.

Kalpakjian, S., Schmid, S.R. **“Manufacturing engineering and technology”**, 6.ed., Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2010, 1176p.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B. **“Teoria da usinagem dos materiais”**, São Paulo: Editora Blucher, 2009, 384p.

Matweb, **“Online materials information resource”**, Disponível em: <www.matweb.com>. Acesso em 26 abr. 2012.

Mello, M. S.; Souza, A. J.; Geier, M.; **“Determinação empírica dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t aplicando ferramenta alisadora no torneamento a seco de acabamento do aço AISI 4140”**, 7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Anais do VII CONEM), 31 Jul - 03 Ago., São Luís, MA, 2012 /Trabalho Aceito/

Mesquita, N.G.M., **“Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação”**. Florianópolis, Tese (Doutorado) – POSMEC, UFSC, 1992, 142p.

Sandvik, **“Manual técnico de usinagem”**, Sandvik Coromant, São Paulo, 2012.

Souza, A. J.; **“Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 1: Fundamentos da usinagem dos materiais”**, GPFAI-DEMEC-UFRGS /Apostila, 2011.

Thomas, T. R., **“Rough Surface”**, Longman, London, 1982, 261p.

Trent, E. M.; Wright, P. K. **“Metal Cutting”**, Editora Butterworth-Heinemann, 2000, 446p.