

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

Diego Carreras Bezerra
diegocarreras@ig.com.br

Izabel Fernanda Machado
machadoi@usp.br

Resumo. Este projeto trabalho de formatura 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 (ap) menor ou igual 0,2 ($f/ap \leq 0,2$). A usinabilidade é avaliada comparando as forças de corte e 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.

1. Introdução

1.1. Introdução teórica

Usinagem é um termo que cobre vários processos de manufatura que envolvem remoção de material. Kalpakjian (2000) expõe que a 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.

O processo de usinagem depende de variáveis independentes de entrada, de variáveis dependentes e de interações entre as variáveis, como explicitado por Peckener (1977) e pelo Metals Handbook - Machining (1989). 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. De acordo com Shaw (1984), a rugosidade está relacionada com a integridade da superfície, sendo um dos aspectos mais importante a serem avaliados em uma superfície usinada. 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_y), rugosidade total (R_t).

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. Segundo normas da ABNT, 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. Trent (1989) revela que 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).

De Shaw (1984), extrai-se que o 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. A formação de cavaco é um fenômeno periódico que ocorre pelo recalque do material contra a superfície de saída da ferramenta.

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 Fig. (1) 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, como vários trabalhos apresentam

(Kovac, 1997; Catálogo de Dinamômetros Piezoelétricos – Kistler AG e Katayama, 1990).

Influenciam nas forças de usinagem: composição química e microestrutura do material e geometria da ferramenta. Fatores metalúrgicos como taxa de encruamento do material, também são relevantes. Se o material apresentar elevado encruamento durante a usinagem, as forças durante o corte também aumentarão.

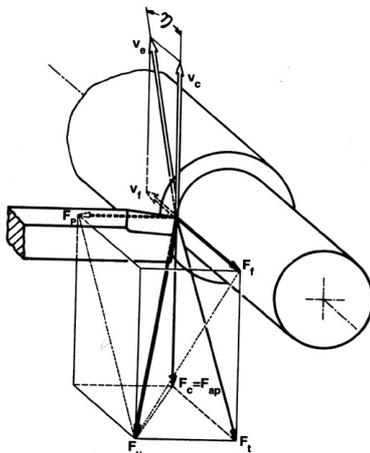


Figura 1. Força de usinagem e suas componentes na operação de torneamento, Ferraresi (1977).

1.1.2. Desgaste e Vida da Ferramenta

De acordo com Shaw (1984), 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. 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: desgaste por atrito, abrasivo, erosivo, difusivo, corrosivo e desgaste por fratura.

1.1.3. Usinabilidade

Do Metals Handbook - Machining (1989), tem-se que 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. Segundo Peckener (1977), 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. 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.

2. Objetivos

Este trabalho de formatura tem por objetivos:

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 Tab. (1) apresenta a composição química nominal do material avaliado.

Tabela 1. Composição química nominal 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. Metodologia

3.2.1. Determinação da Dureza Vickers (HV 30)

A dureza Vickers foi determinada nas seções transversais e longitudinais da barra laminada. 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.

3.2.2. Determinação da Microdureza (HV)

A microdureza foi determinada em regiões tanto da seção transversal quanto da seção longitudinal da barra laminada conjuntamente, por meio da medição de pontos aleatoriamente escolhidos na superfície microestrutural. 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).

3.2.3. 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 medidas foram realizadas para caracterizar o material utilizado nos ensaios.

3.2.4. 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.

3.2.5. 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 o quanto de perlita havia na microestrutura do material. Também foi utilizado o programa Leica (Qwin) para avaliar a fração volumétrica da fase.

3.2.6. 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. Isto 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 μ m e x é o número de intersecções (contornos de grão e interfaces) com o traçado da circunferência-gabarito.

3.2.7. Preparação de Corpos-de-Prova

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 3.2.9.

3.2.8. 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 Vc 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).

3.2.9. Avaliação da força de usinagem - torneamento

A força de corte e de avanço foram medidas utilizando um porta-ferramentas instrumentado com extensômetros (dinamômetro) para medição da força de usinagem. Para armazenamento e tratamento dos dados foi utilizado um microcomputador.

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 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.

Foram realizados ensaios de força de corte e de força 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, são: 10, 100 e 300m/min. Foram realizados 3 ensaios para cada condição, de forma a se permitir uma representatividade estatística.

3.2.10. Tipos de ferramenta

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).

3.2.11. Análise Estatística

Para os parâmetros a serem analisados e mensurados ao longo do trabalho, muitas vezes, fez-se necessário construir intervalos de confiança. 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: $t_{calc} = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_j}{\sqrt{s_i^2/n_i + s_j^2/n_j}}$, 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 4.3), Esforço de Usinagem (item 4.4), Acabamento Superficial (item 4.5), Desgaste (item 4.6) e Cavaco (item 4.7).

4.1. Micrografias

A seguir são apresentadas algumas microestruturas do aço estudado. A Fig. (2) mostra a presença de inclusões, que consistem de sulfeto de manganês. Já a Fig. (3) apresenta as microestruturas do aço estudado após ataque metalográfico, nas quais é possível verificar a presença de dois microconstituintes característicos do aço, em estudo: perlita (regiões enegrecidas) e ferrita (regiões esbranquiçadas).

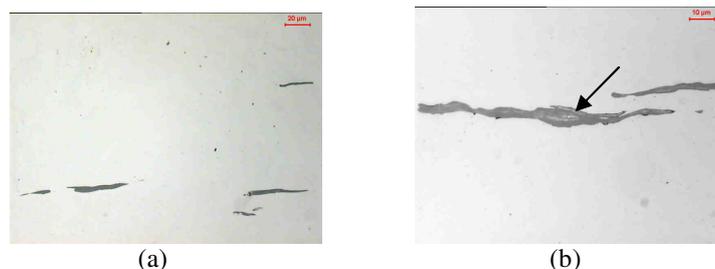


Figura 2. (a) e (b) Presença de inclusões no aço estudado. A seta indica a inclusão de MnS (regiões escuras).

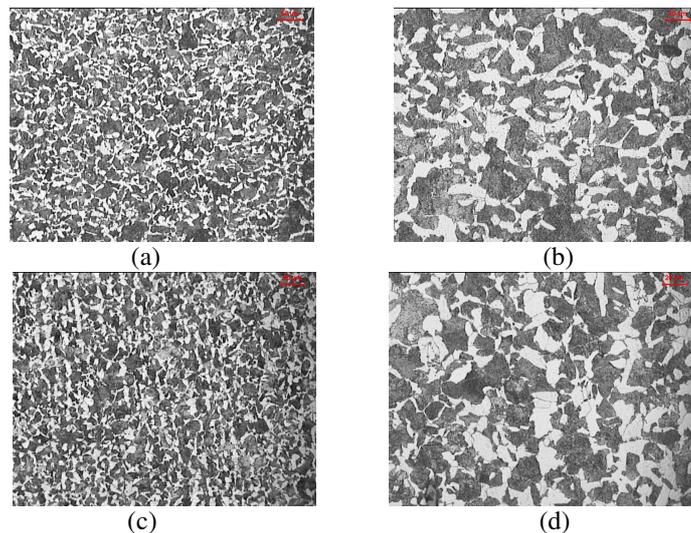


Figura 3. (a) e (b) Seções longitudinal e (c) e (d) transversal do aço estudado. Ataque: Nital. Microscopia óptica. Ressaltam-se: perlita (regiões enegrecidas) e ferrita (regiões esbranquiçadas).

4.2. Fração Volumétrica de Perlita, Tamanho de grão e Dureza Vickers (HV)

Neste item é apresentada uma análise quantitativa da quantidade de perlita existente na microestrutura do aço estudado, o valor médio para o tamanho de grão e a dureza Vickers (HV 30). Segundo, Callister (2000), a perlita apresenta uma microestrutura bifásica resultante da transformação da austenita com composição eutetóide e consiste em camadas alternadas (ou lamelas) de ferrita (α) e cementita (carboneto de ferro – Fe_3C). O valor médio do tamanho de grão é obtido por meio da metodologia para a medição foi descrita no item 3.2.6. A dureza pode ser considerada como a medida da resistência de um material à deformação pela indentação da sua superfície ou por abrasão. Foram obtidos os valores da dureza, medida em Vickers, para as seções longitudinal e transversal, os quais foram reunidos em uma única amostra a fim de determinar o valor da dureza média geral para o aço em estudo. A Tab. (2) apresenta a média e o desvio padrão dos valores de fração volumétrica de perlita, de tamanho médio de grão e da reunião de todas as medidas de dureza em uma única amostra.

Tabela 2. Média e desvio padrão das medidas de fração volumétrica de perlita, tamanho de grão médio e dureza.

Fração Volumétrica de Perlita	Tamanho de Grão Médio	Dureza Vickers (HV 30)
$(61,2 \pm 2,6)\%$	$(12,1 \pm 0,5) \mu m$	$(184,4 \pm 2,7) HV$

A Tab. (3), a seguir, mostra os intervalos de confiança com 95% de probabilidade de o valor real estar contido, para a fração volumétrica de perlita (20 elementos), tamanho de grão médio (20 elementos) e dureza (10 elementos).

Tabela 3. Intervalos de confiança das medidas de fração volumétrica de perlita, tamanho de grão médio e dureza.

Fração Volumétrica de Perlita	Tamanho de Grão Médio	Dureza Vickers (HV 30)
$(61,20 \pm 1,22)\%$	$(12,10 \pm 0,23) \mu m$	$(184,4 \pm 1,93) HV$

4.3. Microdureza (HV)

Como apresentada no item 3.2.2., 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 3.2.1. 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 microconstituintes são, estatisticamente, diferentes entre si. Vale ressaltar a diferença no número de amostras de microdureza para os três microconstituintes. Isso se deve, sobretudo, a dificuldades práticas para encontrar regiões passíveis à medição. Assim, para a ferrita foram determinados 19 pontos, para a perlita 9 pontos e para a inclusão somente 6 pontos foram determinados. A Tab. (4) mostra os intervalos de confiança com 95% de probabilidade de o valor real estar contido, para as inclusões, ferrita e perlita.

Tabela 4. Intervalos de confiança das medidas de microdureza das inclusões, da ferrita e da perlita.

Inclusão	Ferrita	Perlita
$(219 \pm 10) HV$	$(202 \pm 8) HV$	$(250 \pm 12) HV$

4.4. Ensaios de Usinagem

Os resultados (média e desvio padrão) obtidos de pressão de corte experimental (Kse), que representa a força de corte, e da força de avanço corrigida, que representa a força de avanço, são apresentados na Tab. (5). Ressalta-se que os resultados dos ensaios da pressão de corte experimental (Kse) 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). Mesmo utilizando parâmetros que visam corrigir essas diferenças (análise feita com Kse 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 (largura de penetração da ferramenta em relação à peça) causa um aumento no esforço de usinagem além das possibilidades de correção dos parâmetros Kse e Fa (corrigida). O Kse é um parâmetro adotado neste 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 obtido da relação das forças de corte medidas e de parâmetros de usinagem. Adotou-se a seguinte relação para o Kse: $K_{se} = \frac{F_c}{f \cdot ap}$, onde Fc: força de corte, f: avanço e ap: profundidade de corte.

Tabela 5. Ensaios de usinagem. Média e desvio padrão para as condições em estudo.

Condição	Fa-corrigida (N)	Kse (N/mm ²)
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 Fig. (4), encontra-se a variação da Fa (corrigida) e do Kse, em função das velocidades de corte estudadas e das três condições da ferramenta.

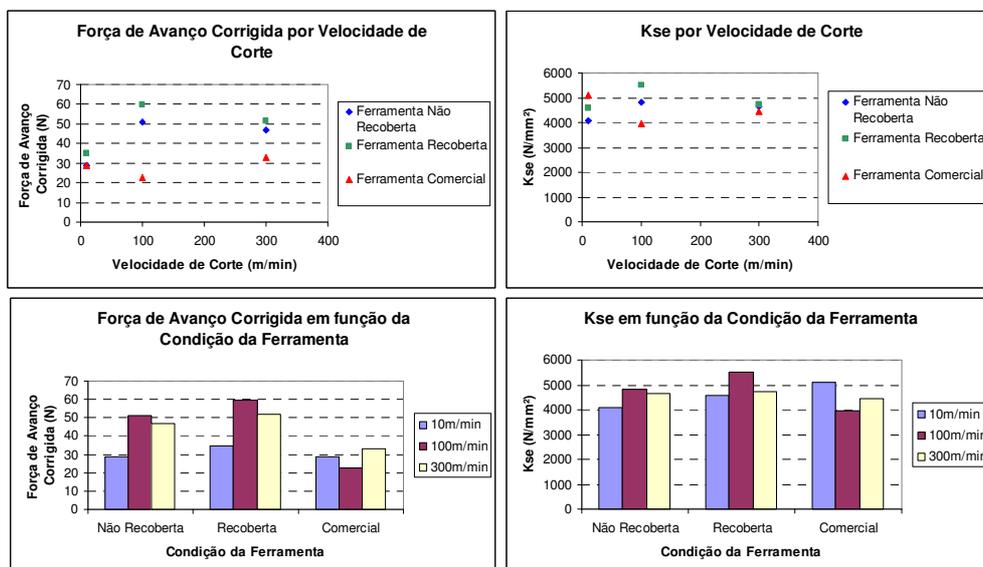


Figura 4. Gráficos da força de avanço corrigida e Kse em função da velocidade de corte e condição de ferramenta.

4.5. Rugosidade

Os valores de rugosidade medidos correspondem ao Ra (rugosidade média), Rt (rugosidade total) e Rp (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 (média e desvio padrão) encontram-se na Tab (6).

Tabela 6. Média e desvio padrão das rugosidades Ra, Rt e Rp, para as condições em estudo.

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

4.6. 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.

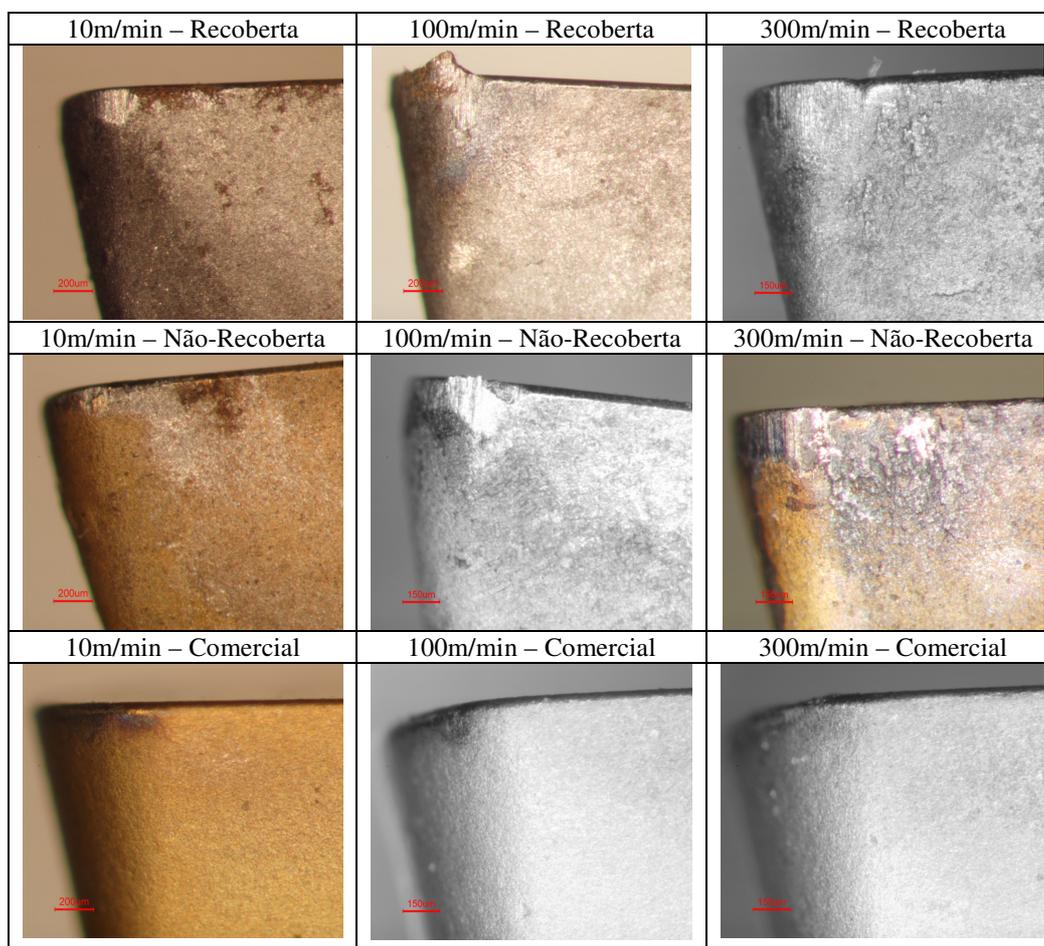


Figura 5. Ponta das ferramentas para as 9 condições ensaiadas. Vista em perfil. Microscopia Óptica.

4.7. 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 etc, as quais se mantiveram constantes para

cada um dos três ensaios de uma dada condição. A fig. (6) apresenta os cavacos obtidos para cada uma das velocidades para a ferramenta recoberta, que os apresentou de forma mais distinta e definida, por isso foi escolhida como exemplo.

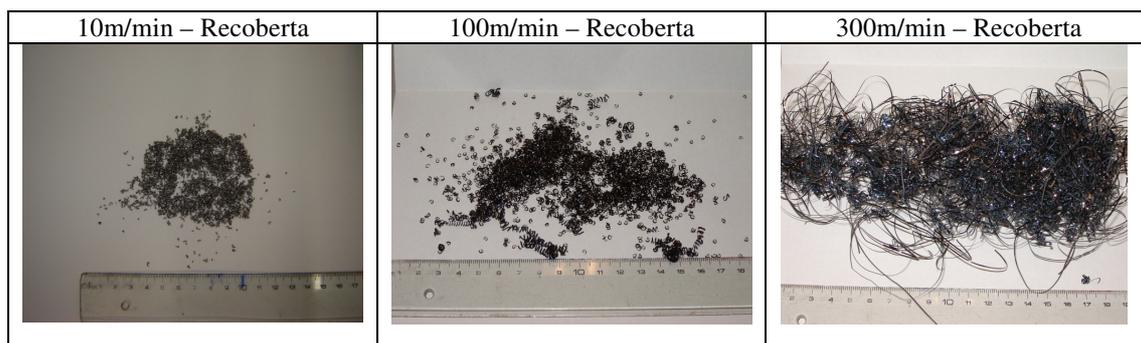


Figura 6. Cavaco gerado no torneamento a 10, 100 e 300m/min com a ferramenta recoberta.

5. Conclusões

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

1. Ratifica-se estatisticamente a diferença de microdureza entre as fases, que já era percebida pelos valores médios, onde: perlita > inclusões > ferrita.
2. Estatisticamente, 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 100 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.
3. Nota-se, estatisticamente, 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.
4. Constata-se que, para a condição de ferramenta *recoberta*, não houve interferência da velocidade de corte na magnitude da pressão de corte experimental, por meio de inferência estatística. 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. 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 estatística 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.
6. 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.

7. Estatisticamente, 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. Assim, 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, ao se avaliar a rugosidade do aço.
8. 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.
9. 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.

6. Agradecimentos

Agradeço ao Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) com toda sua equipe pelo oferecimento dos recursos necessários para o presente trabalho e a ajuda indispensável e, por fim, à minha orientadora pelo apoio, dedicação e empenho incessantes.

7. Referências

- Callister, W. D. Jr., 2000, “Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução”. LTC. 5ª edição.
“Catálogo de Dinamômetros Piezoelétricos”. Kiestler AG
Ferraresi, D., 1977, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”. São Paulo. Edgard Blücher Ltda.
Kalpakjian, S. Schmid, S. R., 2000, “Manufacturing Engineering and Technology”. USA. Prentice Hall. 4ª edição.
Katayama, S.; Hashimura, M., 1990, “Effect of carbon phosphorus and nitrogen contents in steel on machined surface cutting”. ISIJ International, vol 30, pp. 457-563.
Kovac, P., Sidjanin, L., 1997, “Investigation of chip formation during milling”. International Journal of Production Economics. Vol. 51, pp. 149-153.
“Metals Handbook - Machining”, 1989. USA. ASM, vol 16.
Normas ABNT. “Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais”. NBR
Peckener, D.; Bernstein, I.M., 1977, “Handbook of Stainless Steels”. USA. McGraw Hill, Cap. 24.
Shaw, M. C., 1984, “Metal Cutting Principles”. Great Britan. Clarendon Press.
Trent, E. M.; Wright, P. K., 1989, “Metal Cutting”. USA. Butterworth-Heinemann. 4ª edição. 2000.6162. Brasil

EVALUATION OF THE MACHINABILITY OF THE ABNT 1045 STEEL IN DIFFERENT CUTTING SPEEDS AND TOOLS, DURING THE TURNING.

Diego Carreras Bezerra
diegocarreras@ig.com.br

Izabel Fernanda Machado
machadoi@usp.br

Abstract. 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) with and without coating. The wear occurred 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.