



## 20º Congresso de Iniciação Científica

# ESTUDO APLICADO NA FORMAÇÃO DE TEMPERA SUPERFICIAL SIMULTÂNEA AO PROCESSO DE USINAGEM

### Autor(es)

---

GUILHERME GORGULHO

### Orientador(es)

---

ANDRÉ DE LIMA

### Apoio Financeiro

---

FAPIC/UNIMEP

## 1. Introdução

---

Segundo Shaw (1994) em meados dos anos 60, surgiu o termo Integridade Superficial que incluem todos os aspectos de superfície, incluindo acabamento de superfícies, danos metalúrgicos e tensões residuais. A importância da integridade superficial depende sobre seu impacto no desempenho do produto. Características de desempenho são geralmente sensíveis à integridade superficial, incluindo: resistência à fratura, resistência à fadiga e taxa de corrosão. Dentre as alterações de superfície e sub-superfície pode se citar a Camada Afetada pelo Calor (CAC) chamada por alguns autores de Has-Affected Zone (HAZ) e por outros de capa branca, como também pode-se citar rugosidade superficial e tensão residual (DAVIM, 2010). O momento do corte pode ser denominado como momento crítico na usinagem, devido às variações de temperatura e força que agem no momento do corte, provocando danos nas superfícies das peças. Na fabricação de peças de aço é comum a execução da usinagem do material ainda no seu estado normal (sem têmpera), sendo o endurecimento executado posteriormente (tratamento térmico de têmpera), e finalizando com uma fase de revenimento para correção de desvios e alívio de tensões. Essas fases dos processos são, geralmente, realizadas em separado e em locais diferentes. Isto provoca perda de flexibilidade do processo, aumenta os tempos de produção, causa desvantagens de logística, aumentando os custos de produção por consequência (GAMBARO, 2007).

## 2. Objetivos

---

Este projeto tem como objetivo verificar a possibilidade de realizar a têmpera superficial simultânea ao processo de usinagem, otimizando assim o processo em relação a tempo e ao custo. Realizando a têmpera simultaneamente ao processo de usinagem a principal vantagem é diminuir etapas no processo, no qual o tratamento térmico seria depois do processo de usinagem, acontece ao mesmo tempo.

## 3. Desenvolvimento

---

O primeiro passo para se realizar os ensaios que foram desenvolvidos neste trabalho foi a definição do material a ser usinado, assim, optou-se desenvolver os estudos em um aço ABNT 4340, devido a sua utilização em larga escala no setor industrial e também por

causa de suas propriedades mecânicas, como, por exemplo, de usinabilidade e temperabilidade. Logo em seguida da definição do material a ser usinado, foi obtida uma análise de identificação do estado de dureza inicial do material a ser utilizado ao longo dos ensaios, e verificou-se uma dureza inicial em uma faixa entre 15 19 HRC (estado de comercialização). Na execução dos ensaios de torneamento, o formato dos corpos de prova tem como diâmetro 50 mm e comprimento de 154 mm, sendo que deste comprimento 20 mm foram direcionados à fixação do corpo de prova na placa do torno. O ensaio de torneamento foi repetido quatro vezes ao longo do projeto. Nos dois primeiros ensaios, os 134 mm de comprimento restantes foram divididos em 3 (três) pistas (amostras), sendo que cada uma delas têm comprimento de 45 mm aproximadamente. Os outros dois ensaios foram realizados, utilizando somente um único passe, sem a presença de pistas, com o propósito de comparar os parâmetros de usinagem e suas influências sobre as propriedades do material. Nos ensaios realizados foram adotados 3 (três) valores diferentes para o avanço ( $f_n1 = 0,15$ ;  $f_n2 = 0,25$ ;  $f_n3 = 0,35$ ) sendo que cada avanço era direcionado a uma pista. Para o desenvolvimento das descrições das análises será utilizada uma nomenclatura específica para cada ensaio, sendo que cada um dos 4 (quatro) ensaios são mencionados conforme a seguir de acordo com a Figura 1:

- Caso 1 ensaio de torneamento do aço ABNT 4340 com fluido de corte com os parâmetros de usinagem estabelecidos da Figura 1 a);
- Caso 2 ensaio de torneamento do aço ABNT 4340 com fluido de corte com os parâmetros de usinagem estabelecidos da Figura 1 b);
- Caso 3 ensaio de torneamento do aço ABNT 4340 sem fluido de corte com os parâmetros de usinagem estabelecidos da Figura 1 a);
- Caso 4 ensaio de torneamento do aço ABNT 4340 sem fluido de corte com os parâmetros de usinagem estabelecidos da Figura 1 b).

O conjunto de corpos de prova utilizados para o ensaio de torneamento foi formado por um número de 4 (quatro) corpos de prova, sendo que os primeiros dois ensaios referentes aos parâmetros da Figura 1 (Caso 1 e 3), cada um destes foi dividido em 3 (três) pistas, ou seja, 3 (três) amostras a serem analisadas, totalizando 6 (seis) amostras a serem analisadas. E os outros dois ensaios, referentes aos parâmetros da Figura 1 (Caso 2 e 4), foi realizado em apenas um passe, ou seja, 2 (duas) amostras a serem analisadas, totalizando assim, uma quantidade de 8 (oito) amostras a serem extraídas dos ensaios de torneamento. As análises de rugosidade superficial foram realizadas, utilizando um rugosímetro, calibrado antes do início das medições, conforme procedimentos recomendados pelo fabricante e normas técnicas, além da calibração teve o cuidado de manter a temperatura adequada para os ensaios de rugosidade, onde a temperatura variou de 20,3C até 20,5C, prevendo também a estabilização da temperatura dos corpos de prova com ambiente do laboratório. O procedimento de análise de rugosidade superficial, primeiramente teve como objetivo procurar uma única condição de medição, que aceitasse atender as amostras em geral, ou seja, processo de torneamento com e sem fluido de corte. Desta forma, o equipamento utilizado foi configurado para executar as medições no padrão ISO com Cut-off (comprimento da amostragem) de 0,8 adequado para o processo de torneamento, e para o tamanho da pista analisada. Após os ensaios de torneamento, os corpos de prova foram submetidos a análise de rugosidade superficial, onde para cada pista foram realizadas 10 (dez) leituras de rugosidade em pontos diferentes com o propósito de realizar os procedimentos estatísticos recomendados dentre eles, a análise da média aritmética e o desvio padrão entre as leituras buscando assim uma resposta para ser considerada nas análise dos resultados. O primeiro passo da análise da microdureza é a verificação da distância necessária a ser percorrida pelo penetrador ao longo da superfície e subsuperfície das amostras a serem analisadas, pois, esta distância representa a camada que pode ter sofrido alterações durante o processo de usinagem a que foi submetida. Esta distância se torna imprescindível para análise e após sua identificação, podem ser dimensionados os parâmetros distância entre as impressões, quantidades de impressões a serem avaliadas, definir a carga (HV1) a ser aplicada, assimilação da dureza da base da amostra, entre outras de medições para o andamento da análise. Uma quantidade padrão de medições para as análises de microdureza foi definida, determinou 7 (sete) medições ao longo das superfícies e subsuperfícies analisadas. Para a concretização das análises de microdureza, adotou-se um percurso da superfície em sentido ao núcleo. A distância entre as duas impressões de microdureza foi 0,05 mm. A análise metalográfica é baseada na identificação de alterações na micro-estrutura do material (transformação de fases), como, por exemplo, alterações aparentes na superfície analisada, variação na coloração ao longo da amostra. E a análise da CAC direciona a quantificação das alterações, ocorrendo à medição da profundidade das camadas.

#### 4. Resultado e Discussão

---

Em relação com a rugosidade, decidiu-se agrupar os dados em função de um dos parâmetros estudados e métodos estatísticos, como média e desvio padrão, para avaliar os 10 (dez) valores levantados. Os dois métodos estatísticos utilizados neste projeto têm como finalidade auxiliar a veracidade da análise. A média aritmética dos valores levantados tem como objetivo filtrar os valores, ou seja, ter um valor mais próximo do verdadeiro e o desvio padrão para verificar a variância. Com os resultados finais destas análises atingiu-se a algumas respostas no que se refere à identificação dos parâmetros que mais contribuíram para o alcance das oscilações no comportamento da rugosidade superficial das amostras. Os gráficos foram imprescindíveis para a interpretação destas análises, conforme a Figura 2. Os gráficos da Figura 2 a), b), c) e d) é referente ao Caso 1, 2, 3 e 4 respectivamente, onde cada curva do gráfico representa uma pista, que contém os valores de rugosidades referentes às 10 (dez) repetições. No caso do avanço ( $f_n$ ), a escolha pelo agrupamento deste parâmetro aconteceu devido ao entendimento de interferência promovida pelo avanço no comportamento do elemento analisado ( $R_a$ ). Esta interferência foi verificada nos gráficos c) e f), conforme Figura 2. Os valores da rugosidade superficial plotados nestes gráficos são as médias de rugosidade superficial calculadas. Nota-se a partir dos gráficos, que quanto maior o valor do avanço utilizado no momento de corte, maior será o valor da rugosidade superficial encontrada na superfície das amostras realizadas. E que os gráficos c) e f) da Figura 2 que a utilização do fluido de corte aumentou consideravelmente a rugosidade superficial. A finalidade do ensaio de microdureza é apresentar como se comportou a microestrutura da superfície e

subsuperfície das amostras ao longo dos ensaios realizados. Com o intuito de facilitar o entendimento da microdureza nas amostras apresentam-se dois gráficos plotados com os resultados da análise, medidos em HV1, conforme Figura 3. Os gráficos da Figura 3 a) mostram o comparativo entre a microdureza do material da amostra medida em regiões afastadas da superfície (núcleo) das amostras com as medida extraídas das superfícies e subsuperfícies, onde a medida é denominada como medida do núcleo, estes gráficos apresentam os comportamentos assumidos pela análise de microdureza dos ensaios de torneamento com os parâmetros estabelecidos conforme a Figura 1. Nota-se que P1 e CF significam Pista 1 e Com Fluido respectivamente e assim sucessivamente. Vale ressaltar a elevação dos valores de dureza encontrados nas subsuperfícies, fato que se repete em ambos os gráficos. Com isso, conclui-se que o parâmetro fluido de corte, não promove grandes alterações na microdureza. As outras duas variáveis analisadas são o avanço e a velocidade de corte, que são responsáveis pelas oscilações presentes na análise de microdureza desenvolvida. Nota-se pelos gráficos da Figura 3 a), que a dureza na região da superfície diminuiu em relação à dureza inicial, por volta de 230 HV. E em direção ao núcleo das amostras, as durezas se mantêm próximas, com dureza elevadas em relação à superfície, chegando a ter uma diferença de até 100 pontos. Neste projeto, o objetivo é realizar a têmpera simultânea ao processo de usinagem, ou seja, que os materiais estão em seu estado beneficiado. Neste estado, notou-se uma dificuldade visível da formação da CAC. Na Figura 3 b), a amostra da Pista 3 com a utilização do fluido de corte nota-se uma Camada Afetada pelo Calor pouco visível, embora as outras amostras não terem apresentado. Ao longo do desenvolvimento, os parâmetros de usinagem foram alterados inúmeras vezes, com o propósito de forçar o aparecimento da camada afetada pelo calor, mas apareceu pouco visível em apenas um caso. Para determinar a temperatura no momento da usinagem, utiliza-se a fórmula referente à Figura 3 c). Em um primeiro momento, precisa-se determinar a força de corte que é dada pela multiplicação das grandezas: pressão específica de corte ( $K_s$ ), avanço e profundidade de corte. Na Figura 3 d) é ilustrada a determinação da quantidade de calor por minuto em kcal. Após determinar a quantidade de calor, passa-se para a segunda parte, que é a determinação da temperatura final. Nota-se que foi considerado pelo calor específico do aço ABNT 4340 0,115 k cal/ kg C e a massa de 2 kg. Esta massa é equivalente à massa total, ou seja, neste projeto trabalha-se somente com a superfície da amostra então considerou-se 10% da massa total.

## 5. Considerações Finais

---

Tratamento térmico é um conjunto de operações podendo incluir o aquecimento e o resfriamento em condições controladas com a finalidade de modificar as propriedades do aço e de outros materiais existentes. No momento do tratamento térmico, alguns cuidados devem ser tomados, como, por exemplo, o tempo de exposição ao aquecimento, o tempo, os aditivos que irão ser utilizados entre outros. Todos estes cuidados são justificáveis porque o tratamento térmico de um produto em uma empresa é um dos processos que mais agrega valor, este cuidado se torna evidente em torno das empresas no mundo atual, porque além de o tratamento térmico ser caro é um processo irreversível obrigando a terem prejuízos em relação ao tempo e dinheiro. A variável de entrada, denominada fluido de corte e avanço, contribuiu diretamente para a rugosidade das amostras, ou seja, quanto maior o valor do avanço utilizado no momento de corte, maior será o valor da rugosidade superficial e que a utilização do fluido de corte também aumentou a rugosidade superficial. Uma explicação para as amostras, que utilizaram fluido de corte, terem resultado em uma rugosidade superior as demais, é em função da posição em que estava sendo injetado o fluido, ou seja, após o momento de corte e não no momento, ocorrendo assim, um resfriamento severo da peça e não lubrificando a superfície de contato. Em relação a microdureza, o fluido de corte não promoveu alterações na microdureza, pois com e sem a utilização do fluido apresentou um único comportamento. Mas, o avanço e a velocidade de corte estão diretamente atrelados às oscilações presentes nas análises de microdureza deste projeto. Outro fator importante em relação à microdureza é a temperatura na região da superfície, que ficou menor das apresentadas no núcleo. Com isso pode-se confirmar que as amostras não sofreram têmpera, mas sim um auto revenimento. Em paralelo a isto, foi determinada a temperatura no momento da usinagem (400 C), verificando que a temperatura ficou abaixo da temperatura de austenitização (800 C). O aço ABNT 4340 utilizado neste projeto é comercializado em seu estado beneficiado por causa da dureza baixa, entre 15-19 HRC, sendo este aço de boa temperabilidade. A ausência da camada branca de têmpera está diretamente atrelada às condições de parâmetros e temperatura no momento da usinagem. Em todas as amostras, a superfície sofreu um processo de revenimento, que causa uma diminuição de sua dureza.

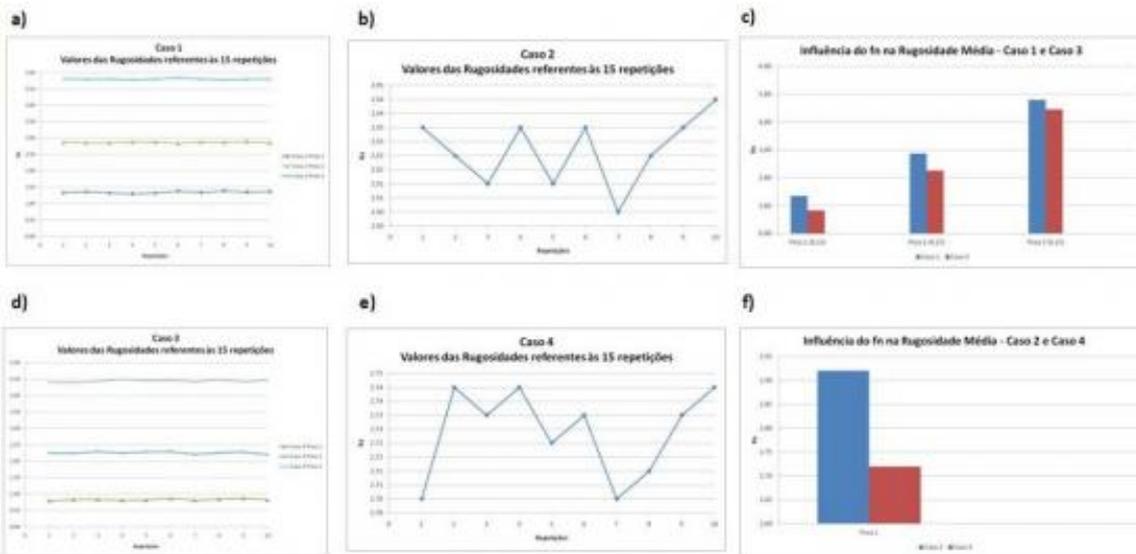
## Referências Bibliográficas

---

- DAVIM, J. P. Surface Integrity in Machining. London: Springer, 2010. 215p.
- FERRARESI, D. Fundamento da Usinagem dos Metais. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- LIMA, A. Análise dos efeitos gerados pelos parâmetros de corte em processos de usinagem, sobre a integridade superficial das peças em aço ABNT 4340. Tese em Engenharia de Produção (Doutorado). Departamento de Fabricação, Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Bárbara dOeste, 2008.
- SHAW, M. Heat-Affected Zones in Grinding Steel. Annals of the CIRP, v43/1. 1994. p.279-282.

## Anexos

---

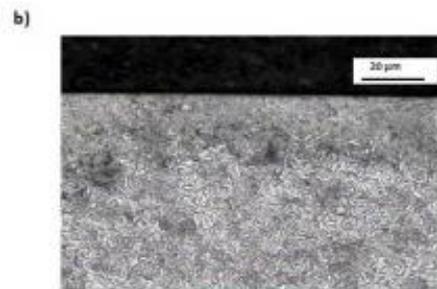
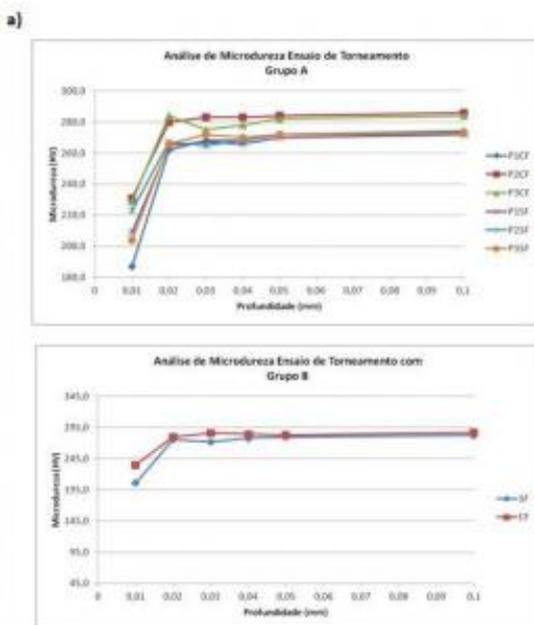


Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Velocidade de Corte	Vc	m/min	255
Avanço	F	mm/rotação	0,15 0,25 0,36
Profundidade de Corte	Ap	mm	0,25

a)

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Velocidade de Corte	Vc	m/min	300
Avanço	F	mm/rotação	0,25
Profundidade de Corte	Ap	mm	0,25

b)



c)

$$Q = \frac{F_c \cdot v}{E} \quad (\text{k cal/min}),$$

$F_c$  = força de corte, em kg\*;  
 $v$  = velocidade de corte, em m/min;  
 $E$  = equivalente mecânico do calor,  $E = 427 \text{ kg}^* \text{m/k cal}$ .  
 Fonte: Ferraresi (1979)

d)

$$Q = \frac{F_c V_c}{E} \quad Q = m c \Delta \theta$$

$$8,52 = \frac{10\% \cdot (2) \cdot 0,115 \cdot (\theta_f - 25)}{427} \quad 8,52 = 0,2 \cdot 0,115 \cdot (\theta_f - 25)$$

$$8,52 = 0,025 \cdot (\theta_f - 25) \quad (\theta_f - 25) = 340,8$$

$$Q = 8,52 \text{ k cal/min} \quad \theta_f = 365,8^\circ \text{C}$$