

# ANÁLISE DOS CAVACOS APÓS TORNEAMENTO DO AÇO SAE 1045 E DO FERRO FUNDIDO NODULAR

## CHIP ANALYSIS AFTER TURNING SAE 1045 STEEL AND NODULAR CAST IRON

<sup>1</sup>SIQUEIRA, Marcelo de Souza; <sup>2</sup>SOUZA, Daniel Ferreira de; <sup>3</sup>RIBEIRO, Fernando Sabino  
Fonteque.

<sup>1a3</sup>Departamento de Engenharia Mecânica – Centro Universitário das Faculdades Integradas de  
Ourinhos-Unifio/FEMM

### RESUMO

Ao longo do tempo, os processos de usinagem passaram por avanços tecnológicos significativos, adaptando-se às demandas dos diversos setores industriais. Entre esses processos, o torneamento destaca-se como uma das operações mais frequentes na usinagem de peças metálicas. Reconhecendo a importância desse processo, realizou-se um estudo para compreender as condições de corte e buscar resultados favoráveis, visando melhorar a qualidade do processo durante o torneamento. Com base nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi conduzir uma análise detalhada dos cavacos gerados durante o processo de usinagem de aço SAE 1045 e ferro fundido nodular em um torno convencional, utilizando diferentes parâmetros de usinagem. O objetivo era estabelecer uma relação entre as condições de corte e os materiais empregados. É bem conhecido que a formação de cavacos durante a usinagem de materiais dúcteis e frágeis apresenta características distintas, permitindo uma comparação dos cavacos produzidos por esses materiais. Para realizar o estudo, procedeu-se ao torneamento de ambos os materiais com diferentes parâmetros de usinagem, a fim de examinar a morfologia dos cavacos. Posteriormente, os cavacos foram coletados, separados e preparados para análise microscópica. Os resultados obtidos evidenciaram que as diferenças entre os materiais, parâmetros e condições de corte influenciam na formação dos cavacos, se condizendo com as referências bibliográficas estudadas. No caso do aço SAE 1045, observou-se a formação de cavacos contínuos com uma superfície lisa em formato espiral, além de uma alteração na coloração quando usinado em alta velocidade de corte, devido ao aumento da temperatura, além da presença de aresta postiça quando usinado em baixa velocidade de corte. Já no ferro fundido nodular, constatou-se a formação de cavacos descontínuos e quebradiços, e a presença da aresta postiça em baixa velocidade de corte, embora em menor intensidade em comparação ao aço SAE 1045. Além disso, observou-se uma significativa perda de força e potência de corte em relação ao aço SAE 1045, devido às diferenças na pressão específica de corte entre os materiais. Por fim, concluiu-se que o uso de baixa velocidade de corte resultou na presença de uma aresta postiça em ambos os materiais, além disso, a baixa velocidade de corte ocasionou vibrações no conjunto. Tanto a aresta postiça quanto as vibrações provocaram prejuízos no acabamento superficial das peças, conforme evidenciado pelos valores obtidos no para a rugosidade.

**Palavras-chave:** Usinagem; Aço SAE 1045; Ferro Fundido Nodular; Cavaco; Análise Microscópica.

### ABSTRACT

Over time, machining processes have undergone significant technological advances, adapting to the demands of different industrial sectors. Among these processes, turning stands out as one of the most frequent operations in the machining of metallic parts. Recognizing the importance of this process, a study was carried out to understand the cutting conditions and seek favorable results, aiming to improve the quality of the process during turning. Based on this context, the objective of this work was to conduct a detailed analysis of the chips generated during the machining process of SAE 1045 steel and nodular cast iron in a conventional lathe, using different machining parameters. The objective was to establish a relationship between the cutting conditions and the materials used. It is well known that the formation of chips during the machining of ductile and brittle materials has different characteristics,

allowing a comparison of the chips produced by these materials. To carry out the study, both materials were turned with different machining parameters, to examine the morphology of the chips. Subsequently, the chips were collected, separated, and prepared for microscopic analysis. The obtained results evidenced that the differences between the materials, parameters and cutting conditions influence the formation of the chips, being consistent with the bibliographical references studied. In the case of SAE 1045 steel, the formation of continuous chips with a smooth surface in a spiral shape was observed, in addition to a change in color when machined at high cutting speed, due to the increase in temperature, in addition to the presence of built-up edge when machined at low cutting speed. In the nodular cast iron, however, the formation of discontinuous and brittle chips was observed, and the presence of built-up edge at low cutting speed, although to a lesser extent compared to the SAE 1045 steel. strength and cutting power relative to SAE 1045 steel due to differences in specific cutting pressure between materials. Finally, it is concluded that the use of low cutting speed resulted in the presence of a built-up edge in both materials, in addition, the low cutting speed caused vibrations in the set. Both the built-up edge and the vibrations caused damage to the surface finish of the parts, as evidenced by the values obtained in for roughness.

**Keywords:** Machining; SAE 1045 Steel; Nodular Cast Iron; Chip; Microscopic Analysis.

## INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem evoluíram tecnologicamente conforme as necessidades dos setores industriais, como o automotivo, naval, aeroespacial e construção civil. Com os avanços tecnológicos nos processos, agregou-se maior precisão, produtividade e eficiência na fabricação de peças (FERRAMENTAL, 2021). Entretanto, o método convencional da usinagem ainda possui amplo uso na indústria, especialmente por empresas que fabricam peças em pequenas quantidades, ou de peças com geometrias não muito complexas (FITZPATRICK, 2013).

As operações de usinagem consistem num processo industrial utilizado para remover material de uma peça bruta com o objetivo de obter uma peça com as dimensões e formas desejadas. Essas operações são realizadas por máquinas específicas, como tornos, fresadoras, furadeiras, e máquinas retificadoras, que utilizam ferramentas de corte para desbastar a peça e dar forma à superfície. Quando a ferramenta de corte entra em contato com a peça, ela remove pequenos pedaços de material, formando os chamados cavacos (FERRARESI, 2018).

O torneamento é uma das operações mais comuns no ramo da usinagem de peças metálicas. Durante o processo de torneamento segundo Machado et. Al (2015) a peça gira em torno de seu próprio eixo, enquanto a ferramenta de corte entra em contato com a superfície da peça, removendo camadas finas de material, até se formar a peça desejada.

Conforme aponta Diniz (2014) os cavacos podem ser finos e longos, curtos e grossos, em forma de espiral, entre outros formatos. O tamanho e formato dependem de qual operação de usinagem está sendo utilizada, do material da peça, da velocidade de avanço, do corte, e da profundidade de corte.

O propósito deste estudo é examinar minuciosamente através de um microscópio os cavacos produzidos quando materiais dúcteis e frágeis são usinados em um torno convencional, em corte à seco em diferentes condições de velocidade de corte. Os materiais escolhidos para este estudo são o aço SAE 1045 e o ferro fundido nodular devido as diferenças entre si, permitindo assim que se obtenha informações valiosas sobre a qualidade do processo e as condições de corte utilizadas. Este trabalho foi realizado experimentalmente nos laboratórios de Processos de Fabricação e Metalografia, do Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos – UNIFIO.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Nesta seção, serão descritos os procedimentos adotados para a implementação prática deste estudo, realizando abordagem do desenvolvimento de trabalho, incluindo informações detalhadas sobre os materiais utilizados, ferramenta utilizada, seleção dos parâmetros utilizados, bem como os métodos empregados para a usinagem no torno e para as análises realizadas.

Foram escolhidos o aço SAE 1045 e o ferro fundido nodular, ambos na forma de barras de perfil redondo (Figura 1), sendo o primeiro sob a forma trefilada, para a realização do presente estudo. A escolha deste perfil se deu pela geometria ideal para realização do processo de torneamento, enquanto a definição dos materiais a serem utilizados na realização deste estudo justifica-se pelas propriedades mecânicas dos mesmos, tais como boas resistências mecânicas e usinabilidade.

**Figura 11** - Barras de aço SAE 1045 e ferro fundido nodular antes dos processos de usinagem.



A usinagem dos materiais foi realizada no Laboratório de Processos de Fabricação do Centro Universitário de Ourinhos, em um torno mecânico universal da marca Clever, modelo L-1440 (Figura 2). Dentre suas características técnicas destacam-se: rotações da placa entre 70 a 2000 RPM, potência de 2,25 hp e capacidade entre pontas de até 1000 mm, sendo estas apropriadas para realização do torneamento.

**Figura 2** - Torno mecânico universal utilizado.



Para o torneamento dos tarugos, foi utilizado um inserto de metal duro, identificado pelo código ISO TNMG 16 04 08-PM 4225, da fabricante Sandvik Coromant. A escolha desta ferramenta justifica-se pela capacidade de usinagem de diversos materiais, incluído aços carbono e ferros fundidos, resistência ao desgaste de sua camada superior, que entra em contato com a peça e o cavaco gerado pela mesma, além de possuir características suficientes para realização do estudo, como profundidade de corte, avanço de trabalho e velocidade de corte adequadas para a atividade executada. Para a execução do torneamento, faz-se necessária a fixação do inserto a um suporte, conferindo a estabilidade necessária para remoção de material desejada. Desta maneira, utilizou-se um porta-ferramenta compatível com a ferramenta de trabalho, da marca W Tools, cujo código correspondente é MTJNR 2525 M16.

**Tabela 1** - Características do inserto utilizado.

Formato	Aresta da pastilha (mm)	Espessura da pastilha (mm)	Ângulo de folga	Quebra cavaco	Raio de ponta da ferramenta (mm)
Triangular	16	4,76	0°	Ambos os lados	0,8

**Tabela 2** - Características do porta-ferramenta utilizado.

M (tipo de fixação)	T (formato do inserto)	J (ângulo de posição/ângulo de ataque)	N (ângulo de folga)	R (sentido de corte)	Largura do suporte (mm)	Altura do suporte (mm)	M (comprimento da ferramenta) (mm)	Comprimento da aresta de corte (mm)
Pino e grampo	Triangular	93°/-3°	0°	Direita	25	25	150	16

Para a realização do torneamento, definiu-se a realização de dois passes para cada um dos tarugos de maneira a possibilitar a alteração da velocidade de corte sobre os mesmos, sendo cada passe realizado da extremidade da barra até um comprimento de aproximadamente 149 mm, alternando-se o lado do tarugo na execução de cada passe de torneamento, de modo a analisar a variação do parâmetro de corte designado.

Assim sendo, foi determinada a utilização de 755 RPM na placa do torno para o primeiro passe de torneamento nos tarugos, com aplicação de um avanço de trabalho de 0,325 mm/rotação e profundidade de corte de 1 mm em relação ao diâmetro, ou 0,5 mm em relação ao raio da peça. Com a finalização da usinagem do primeiro lado dos tarugos, para a usinagem do segundo lado dos mesmos estabeleceu-se 70 RPM como rotação de trabalho da placa do torno, diminuindo substancialmente a velocidade de corte, mantendo os demais parâmetros de usinagem.

Após a usinagem completa dos materiais, foi realizada a microscopia dos cavacos, coletados imediatamente após a execução de cada passe de torneamento, bem como das superfícies usinadas no Laboratório de Metalografia e Máquinas térmicas do Centro Universitário de Ourinhos. As observações foram realizadas em um microscópio óptico da marca Opton, permitindo a análise da influência dos parâmetros obtidos sobre o subproduto da usinagem, os cavacos, e a superfície da peça.

Para a avaliação do estado de superfície dos perfis usinados optou-se pela avaliação quantitativa da rugosidade através de um rugosímetro. Para esta finalidade, realizou-se a medição da rugosidade no Laboratório de Metrologia do SENAI Ourinhos, utilizando um rugosímetro da marca Mahr, modelo MarSurf M 300 C, oferecendo excelentes condições para análise em relação ao perfil da superfície usinada.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A seguir serão apresentados os resultados obtidos durante procedimento experimental. Esta abordagem envolve os procedimentos executados, observações efetuadas, bem como a análise dos resultados obtidos, além de realizar discussões sobre as causas destes últimos, interligando-os às grandezas e fenômenos decorrentes do processo de usinagem empregado.

A partir do recolhimento dos cavacos imediatamente após a execução de cada passe de torneamento, selecionou-se uma amostra dos cavacos obtidos de acordo com o material usinado e os parâmetros de corte estabelecidos para realização do torneamento, para inspeção visual, classificando os mesmos em relação ao tipo e à forma, conforme a Tabela 3:

**Tabela 3** - Classificação da forma e tipo dos cavacos de acordo com material e parâmetros de corte estabelecidos.

<b>Material</b>	<b>Velocidade de corte (m/min)</b>	<b>Tipo de cavaco</b>	<b>Forma de cavaco</b>
Aço 1045	120,49	Contínuo	Cavaco helicoidal longo
Aço 1045	11,17	Contínuo	Cavaco tubular longo
Ferro fundido nodular	120,49	Descontínuo	Cavaco tubular curto
Ferro fundido nodular	11,17	Descontínuo	Cavaco em arco solto

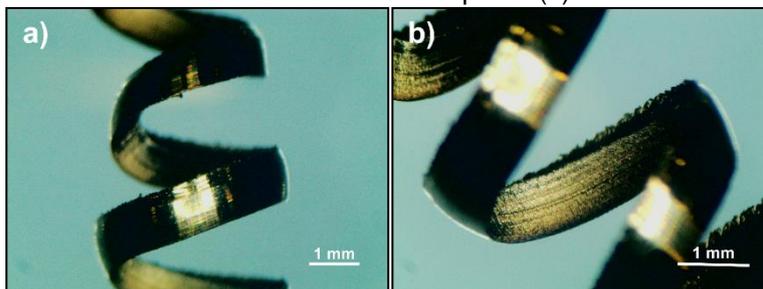
Verificou-se que o tipo de cavaco obtido é predominantemente ocasionado pelo material da peça, observando que a obtenção de cavacos contínuos aconteceu a partir da usinagem de um material dúctil, o aço SAE 1045, enquanto os cavacos descontínuos foram gerados no torneamento de um material mecanicamente frágil, não suportando grandes deformações antes de sua quebra, o ferro fundido nodular.

As considerações realizadas para os tipos de cavaco se assemelham à análise da forma dos cavacos. O material da peça apresentou-se como fator de maior influência, seguido pela alteração de parâmetro de corte. Como o avanço e a profundidade de corte mantiveram-se inalteradas durante a usinagem dos materiais, constata-se que a velocidade de corte também influencia a forma dos cavacos.

A realização de análise microscópica das amostras de cavaco selecionadas permitiu a verificação de particularidades características dos materiais usinados e parâmetros de corte utilizados, evidenciando os resultados obtidos no torneamento realizado.

A partir da visualização microscópica do cavaco de aço SAE 1045 usinado com a maior velocidade de corte, é possível evidenciar uma superfície lisa localizada no lado externo do cavaco, área essa provinda do contato cavaco-ferramenta, enquanto internamente, é possível a observação de uma superfície áspera, superfície essa livre durante a deformação. Essas observações mostram que a região de contato cavaco-ferramenta, neste caso, tende a gerar uma superfície lisa, minimizada a adesão devido ao baixo coeficiente de atrito promovido pelo revestimento da ferramenta de corte. A diferença entre as duas regiões pode ser vista na Figura 3.

**Figura 3** - Visualização em destaque das superfícies externa (a) e interna de um cavaco de aço SAE 1045 torneado com velocidade de corte superior (b).

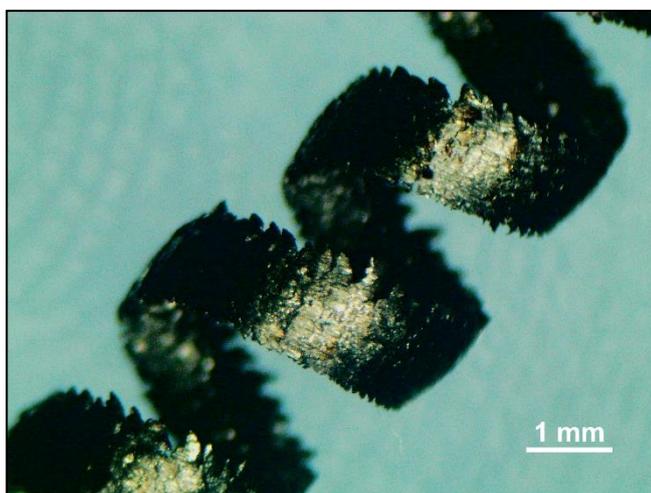


Outro aspecto evidenciado na formação deste cavaco do tipo contínuo é que, apesar da grande deformação no plano de cisalhamento primário, não houve a propagação da trinca ao longo deste plano, o que permitiu a continuidade da formação da hélice, levando à formação de um cavaco do tipo contínuo.

A coloração do cavaco indica geração de calor acentuada entre a peça e a ferramenta de corte, caracterizada por altas temperaturas na zona de contato cavaco-ferramenta. Este fenômeno pode ser explicado pelo aumento da velocidade de corte, que, por sua vez, promove um aumento na taxa de cisalhamento do material, o que eleva a temperatura na zona de corte.

Diferentemente dos cavacos de aço, os cavacos de ferro fundido nodular usinados com a velocidade de corte superior possuem diferente estrutura, conforme microscopia apresentada na Figura 4:

**Figura 3** - Cavaco de ferro fundido nodular usinado com velocidade de corte superior, submetido à microscopia.



Enquanto não há a propagação da trinca nos cavacos do tipo contínuo, na usinagem do ferro fundido nodular há facilidade de propagação de trinca nos cavacos ao longo do plano de cisalhamento primário, não suportando deformações significativas, sendo estes liberados com certa facilidade da zona de corte com a tensão aplicada. Estas características podem ser justificadas pela fragilidade do ferro fundido em comparação ao aço, sendo sua microestrutura caracteristicamente frágil devido à sua matriz de composição, não suportando grandes deformações plásticas.

Na Figura 5, observa-se a estrutura de um cavaco de aço 1045 utilizando baixa velocidade de corte:

**Figura 4** - Microscopia de cavaco de aço 1045 usinado com baixa velocidade de corte.



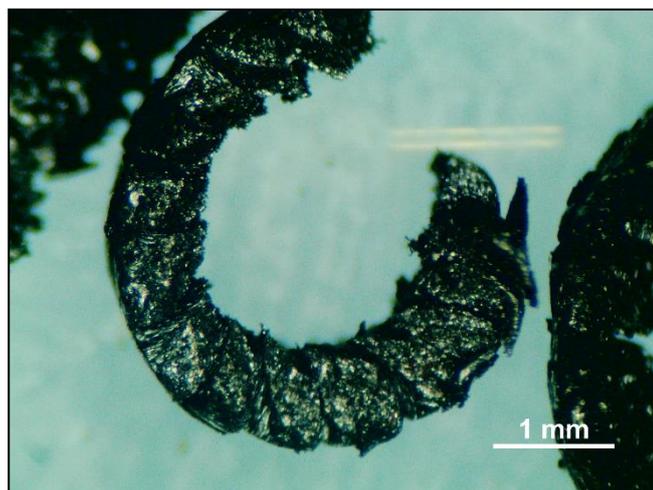
Notadamente, há a presença de uma estrutura distinta neste cavaco. A morfologia deste cavaco difere-se, dentre outras, pela ocorrência de aresta postíça de corte na superfície externa do cavaco, causada pela presença de material da peça acumulado na superfície de saída da ferramenta durante a usinagem, observada a olho nu após a usinagem do aço 1045 em baixa velocidade de corte. A existência de aresta postíça de corte nesta usinagem pode ser explicada pela aplicação de baixa velocidade de corte, além do torneamento de um material dúctil.

Com a presença desta estrutura na ferramenta de corte, percebe-se um aumento do ângulo de saída da ferramenta, o que, por sua vez, promove uma

diminuição nas forças de usinagem e temperatura na região de interface cavaco-ferramenta.

Assim como na usinagem no tarugo de ferro fundido nodular com velocidade de corte mais alta, a aplicação de baixas velocidades de corte promove cavacos do tipo descontínuo, todavia, havendo diminuição do comprimento destes cavacos, promovidas pela alteração deste parâmetro de corte. As trincas são propagadas com maior facilidade ao longo do plano de cisalhamento primário neste caso, sendo liberados da zona de corte ainda mais facilmente em relação a velocidades de corte maiores.

**Figura 6** - Microscopia de cavaco de ferro fundido nodular usinado com baixa velocidade de corte.



De acordo com os procedimentos descritos anteriormente, os parâmetros de rugosidade foram mensurados, sendo a média aritmética das três medições realizadas para cada um dos lados usinados dispostas na Tabela 4:

**Tabela 4** - Valor dos parâmetros de rugosidade para cada material e velocidade de corte utilizadas.

Material	Ferro Fundido	Ferro Fundido	Aço 1045	Aço 1045
<b>Velocidade de corte [m/min]</b>	<b>120,49</b>	<b>11,17</b>	<b>120,49</b>	<b>11,17</b>
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	3,173	6,014	4,268	8,427
Rq [ $\mu\text{m}$ ]	3,972	7,573	5,036	10,04
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	18,59	31,61	18,56	36,51

Pode-se constatar que a diminuição da velocidade de corte no torneamento executado resultou em um aumento do valor dos três parâmetros de rugosidade medidos.

A presença da aresta postiça no torneamento em baixa velocidade de corte, gera grandes prejuízos no acabamento superficial, à medida que o aumento da velocidade de corte leva à diminuição da ocorrência da aresta postiça de corte, o que, por sua vez, promove melhor acabamento superficial, como pode ser comprovado por meio dos valores obtidos.

Adicionalmente, pode-se atribuir o aumento dos valores dos parâmetros medidos à maiores vibrações geradas na ação do corte em baixas velocidades de corte. Menores valores de rugosidade para o ferro fundido nodular usinados com velocidade de corte inferior podem ser correlacionadas à maior capacidade deste material de absorver vibrações.

Além disso, valores inferiores da força de corte resultantes de valores reduzidos da pressão específica de corte para o ferro fundido nodular permitem menor contato da ferramenta com a superfície da peça, o que melhora o acabamento da superfície, além de reduzir o desgaste da ferramenta de corte.

## **CONCLUSÃO**

Da análise dos resultados obtidos, verifica-se que a alteração da velocidade de corte no torneamento possui influência significativa na formação de cavacos, alterando sua morfologia. Com a utilização de velocidades de corte mais elevadas percebeu-se formação de cavacos de maior comprimento, o que é explicado pela presença de temperaturas mais altas na interface cavaco-ferramenta ocasionadas por maiores taxas de cisalhamento, alterando ainda a coloração de cavaco de aço 1045. Em vista da manutenção dos demais parâmetros de corte, percebe-se que a velocidade de corte possui também influência quanto à forma dos cavacos.

Com a utilização de baixas velocidades de corte constatou-se formação de aresta postiça de corte na usinagem de ambos os materiais, porém com menor tendência de formação durante a usinagem do ferro fundido. A presença de APC (aresta postiça de corte), aliada à maiores vibrações ocorridas na utilização da velocidade de corte inferior geraram prejuízo no acabamento superficial da peça, o que pode ser comprovado por valores mais altos dos parâmetros de rugosidade obtidos.

Percebeu-se que o torneamento do ferro fundido foi acompanhado de reduções significativas da força e potência de corte em relação à usinagem do aço 1045, devido à diferença da pressão específica de corte entre os dois materiais. Assim, foi verificado que um menor contato entre a ferramenta de corte e a superfície usinada promoveram uma melhoria do acabamento superficial. Os resultados analisados possuíram concordância com a literatura.

## REFERÊNCIAS

DINIZ, Anselmo Eduardo. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artliber, 2014.

FERRAMENTAL. Usinagem: o que é e qual a importância desse processo? **Revista Ferramental**, 2021. Disponível em: <<https://www.revistaferramental.com.br/artigo/usinagem-o-que-e-qual-a-importancia-desse-processo/>>. Acesso em: 07 setembro 2023.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Bluncher, 2018.

FITZPATRICK, Michael. **Introdução aos processos de usinagem**: Série Tekne. Bookman Editora, 2013.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. Editora Blucher, 2015.