



# ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



02 a 04  
de dezembro 2020

## Estudo do sinal de emissão acústica durante o torneamento do ferro fundido vermicular

**Bruna Aparecida Rezende**

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção - UFMG  
Departamento de Engenharia e Computação – IFMG Campus Bambuí

**Anderson Júnior dos Santos**

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – UFMG  
Departamento de Engenharia Mecânica – IF SUDESTE Campus Muriaé

**Natália Fernanda Santos Pereira**

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção - UFMG

**Marcelo Araújo Câmara**

Departamento de Engenharia Mecânica - UFMG

**Juan Carlos Campos Rubio**

Departamento de Engenharia Mecânica - UFMG

**Resumo:** O ferro fundido vermicular é um material comumente utilizado na indústria automobilística, principalmente em blocos de motores a diesel. Para obtenção da forma final das peças em formato cilíndrico, uma das operações utilizadas é o torneamento. Assim, o presente trabalho buscou avaliar o desempenho de diferentes insertos (com e sem revestimento), por meio dos sinais de emissão acústica (EA). Para a obtenção dos sinais de EA foi utilizado um sensor com faixa de frequências entre 100-200 kHz. Os principais resultados demonstraram que os sinais de EA são benéficos para identificar os mecanismos de desgaste atuantes durante o torneamento. Sendo assim, o par tribológico ferro fundido vermicular e insertos revestidos foram os que apresentaram menores amplitudes de EA. Esses resultados sugerem uma menor força de atrito e conseqüentemente um menor desgaste de ferramenta, sendo favorável para minimizar custos com ferramenta de corte.

**Palavras-chave:** Metal duro. Óxido de alumínio. Dióxido de titânio. Força de atrito.

## Study of the acoustic emission sign during the turning of compacted graphite iron

**Abstract:** The compacted graphite iron is a material commonly used in the automotive industry, especially in diesel engine blocks. To obtain the final shape of the pieces in cylindrical format, one of the operations used is turning. Thus, the present work sought to evaluate the performance of different inserts (with and without coating), through acoustic emission (AE) signals. A sensor with a frequency range of 100-200 kHz was used to obtain the AE signals. The main results demonstrated that the EA signals are beneficial for identifying the wear mechanisms that are active during turning. Thus, the tribological pair compacted graphite iron and coated inserts were the ones that presented smaller amplitudes of EA. These results suggest a lower frictional force and consequently less tool wear, being favorable to minimize cutting tool costs.

**Keywords:** Tungsten carbide. Aluminum oxide. Titanium dioxide. Frictional force.

## 1. Introdução

As principais aplicações do ferro fundido vermicular são na indústria automobilística, com destaque para os coletores de exaustão, blocos de motores diesel, cabeçote do motor, etc. (TUPY, 2018), conforme destacado na Figura 1.

Figura 1 – Aplicação do ferro fundido vermicular



Fonte: TUPY (2018)

As propriedades mecânicas do ferro fundido vermicular encontram-se entre as dos ferros fundidos cinzentos e nodulares, como pode ser observado por meio da Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular de matriz perlítica

Propriedades	Cinzento	Vermicular	Nodular
Limite de Resistência (GPa)	55	100	155
Limite de Escoamento (GPa)	-	100	155
Módulo de Elasticidade (Mpa)	75	100	110

Fonte: Adaptado de Norma SAE J 1887:2002 – Guessser (2009)

Os ferros fundidos vermiculares representam uma família dos ferros fundidos, em que a grafita apresenta-se em forma de vermes ou compacta (GUESSER, 2009). Com relação à usinagem este material exibe a formação de cavacos descontínuos, que tendem a causar flutuações na força de corte e vibração. Por outro lado, a baixa condutividade térmica do ferro fundido vermicular ( $47 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ) resulta em desgaste oxidativo e descamação do revestimento, devido ao acúmulo de calor durante a operação de usinagem (YUAN *et al.*, 2014).

Machado *et al.* (2015) citam algumas recomendações a serem seguidas para a obtenção de um bom desempenho na usinagem dos ferros fundidos, sendo elas:

- Baixa porcentagem de carbono pode levar a dificuldades no processo de usinagem;
- Microestruturas com alto teor de Si na ferrita são menos dúcteis, mais resistentes mecanicamente e com menor tendência ao aparecimento de aresta postiça de corte;
- Aumento de perlita provoca aumento da dureza e resistência mecânica, o que tende a diminuir o desempenho do processo;
- Estrutura lamelar refinada provoca piores desempenhos na usinagem;

- Presença de carbonetos (partículas de alta dureza) na microestrutura reduzem as condições de corte;
- Partes superiores do material fundido apresentam as piores impurezas;
- Ferros fundidos vermiculares e brancos são mais difíceis de usinar, em comparação com os outros.

Por outro lado, Sousa *et al.* (2018) listam o ferro fundido vermicular como um material difícil para o corte, apontando três fatores:

- Material que tende a produzir cavacos descontínuos e serrilhados, causando flutuação e vibração de alta frequência durante o processo de corte;
- A baixa condutividade térmica provoca acúmulo de calor na interface cavaco-ferramenta, causando aderências nas superfícies das ferramentas utilizadas;
- Contém uma porcentagem significativa de titânio, o que promove a formação de carbonitreto de titânio (TiCN) e carboneto de titânio (TiC). Tais partículas apresentam alta dureza, levando ao desgaste das ferramentas de corte.

Com o intuito de se obter um desempenho superior das ferramentas de corte, os revestimentos surgem como uma alternativa na usinagem de materiais. De acordo com Astakhov (2006), o objetivo de qualquer revestimento se resume em melhorar as condições tribológicas nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, devendo apresentar algumas características, as quais são citadas por KALPAKJIAN e SCHIMD (2013):

- Alta dureza;
- Estabilidade química e inerte;
- Baixa condutividade térmica;
- Compatibilidade e boa ligação ao substrato;
- Pouca ou nenhuma porosidade.

Em ferramentas de corte, os mais utilizados são o PVD e o CVD, que são métodos de deposição no estado gasoso. O principal fator que limita a utilização do processo CVD é a temperatura do tratamento, que é de, aproximadamente 1000°C, sendo que, para o PVD, essa temperatura fica em torno de 500°C. Dentre os métodos no estado de solução, tem-se o sol-gel, que, apesar de ser um método de deposição de revestimentos comumente empregado, seu uso em ferramentas de corte é relativamente baixo.

A técnica PVD consiste na deposição de um revestimento de forma física, e a CVD, na deposição de um sólido em uma superfície aquecida por meio de uma reação química de vapor ou gás. Tais técnicas apresentam algumas desvantagens, já que, para o processo CVD, a temperatura é um fator limitante, não podendo ser utilizado em substratos com baixo ponto de fusão. Além disso, baixa eficiência, precursores tóxicos e alta energia requerida, devido à necessidade de altas temperaturas de deposição, também podem ser citados (ASM, 1994). Considerando-se as diferentes categorias do processo PVD, podem ser citadas desvantagens como o fato de que muitos parâmetros de processamento devem ser controlados, além de haver pouca utilização de material vaporizado e formação de glóbulos fundidos do material ejetado da superfície sólida (MATTOX, 2010).

Dessa forma, o processo sol-gel apresenta como principal vantagem o fato de que óxidos sólidos podem ser produzidos e processados em baixas temperaturas (WRIGHT e SOMMERDIJK, 2001; DAI *et al.*, 2009; MACKENZIE, 1984 apud BRINKER e SCHERER, 1990). Por meio da técnica sol-gel, também é possível a preparação de um filme para aplicações tecnológicas com baixo custo (YANG, ZHANG e MO, 2014).

Revestimentos cerâmicos como o óxido de titânio e óxido de alumínio tem sido comumente aplicados em ferramentas de corte devido às suas propriedades. O TiO<sub>2</sub> apresenta-se biocompatível, bem como boa estabilidade da estrutura química, resistência ao calor, e

boas propriedades físicas, ópticas e elétricas (MACWAN, DAVE e CHATURVEDI, 2011). Já o  $Al_2O_3$  é quimicamente inerte e apresenta baixa condutividade térmica (KALPAKJIAN E SCHIMD, 2010).

Uma das formas de monitoramento dos diferentes fenômenos decorrentes da usinagem, bem como da identificação dos mecanismos de desgastes, é por meio da emissão acústica (EA). A EA pode ser definida como uma onda de som que propaga por meio do material, decorrente da liberação de tensões de energia (LI, 2002). Isso ocorre porque há a presença de rearranjos na estrutura interna do material. A tabela 2 relaciona diferentes fenômenos no corte de materiais e suas faixas de frequências de EA correspondentes.

**Tabela 2 – Principais fenômenos excitadores de sinais de EA e suas frequências**

Fenômeno	Faixa de frequência de EA (kHz)
Usinagem	70 a 115
Camada branca	> 60
Aderência e arrastamento	250 a 350
Movimento de deslocação	0 a 120
Interação de partículas	120 a 350
Desgaste abrasivo	200 a 1000
Propagação de trincas	350 a 550
Transformação de fase	350 a 550
Acomodação de vazios	220 a 380
Aniquilação de deslocação	100
Deslocação de Frank-Read	1000
Deformação plástica	50
Deformação plástica	150 a 500
Deformação elástica	25 a 250

Fonte: (Marinescu e Axinte, 2008; Guo e Ammula, 2005; Mostafapour *et al.*; 2004, Wada *et al.*; 1989, Ferrer *et al.*; 2010, Wada *et al.*; 1990, Chung *et al.* 2004; Hase *et al.*, 2006, e Wada *et al.*, 1990; Ramadan *et al.*, 2008; Baranov, 2009; Mostafapour *et al.*, 2014; Sasada *et al.*, 1976; Baranov, 2009; Baranov, 2009; Wada, 1989 *apud* MAIA, 2015)

Assim, o presente trabalho busca identificar os mecanismos de desgaste durante o torneamento de ferro fundido vermicular, por meio do estudo dos sinais de EA, bem como verificar a influência dos revestimentos utilizados e determinar qual revestimento apresentou um menor desgaste visual na ferramenta de corte.

## 2. Materiais e Métodos

Esta seção apresenta o planejamento experimental, bem como a descrição do corpo de prova, ferramentas, parâmetros de corte e equipamentos utilizados.

### 2.1. Corpo de prova e ferramentas

A peça utilizada consistiu de um cilindro obtido por processo de fundição, em ferro fundido vermicular, classificado na classe perlítico-ferrítico, com comprimento de 300 mm e diâmetro externo de 69 mm. Os insertos utilizados foram de metal duro classe K10, face plana. Os ensaios de usinagem e tribômetro foram realizados a seco.

### 2.2. Parâmetros de corte

Na tabela 3 são apresentadas as variáveis de entradas do experimento, bem como os níveis de cada uma. Foram realizados no total 3 experimentos, sendo uma réplica para cada experimento. A profundidade de usinagem ( $a_p$ ) utilizada foi de 1 mm e comprimento de usinagem de 50 mm.

**Tabela 3 – Parâmetros de corte e ferramentas utilizadas**

Parâmetros	Níveis		
	1	2	3
Insertos de metal duro	Sem revestimento	Com revestimento de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Multicamadas (TiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Velocidade de corte ( $v_c$ )	125 m/min	125 m/min	125 m/min
Avanço ( $f$ )	0,3 mm/rev	0,3 mm/rev	0,3 mm/rev

Fonte: Os autores (2020)

### 2.3. Equipamentos

O ensaio de torneamento foi realizado em um torno Romi modelo Centur 30S com potência de 5,5 kW e rotação máxima de 3500 rpm. Para aquisição dos sinais de emissão acústica foi utilizado o sensor MCWade Associate NS3303 de 150 kHz, pré-amplificador de sinais tipo PA 3301 com ganho de 40 db e regulador de sinais DFF-01. O equipamento foi conectado em uma placa de aquisição National Instruments USB – 6366, conectada a um computador equipado com Windows XP Professional, processador Intel i5-2500 e memória RAM de 4 gigabytes.

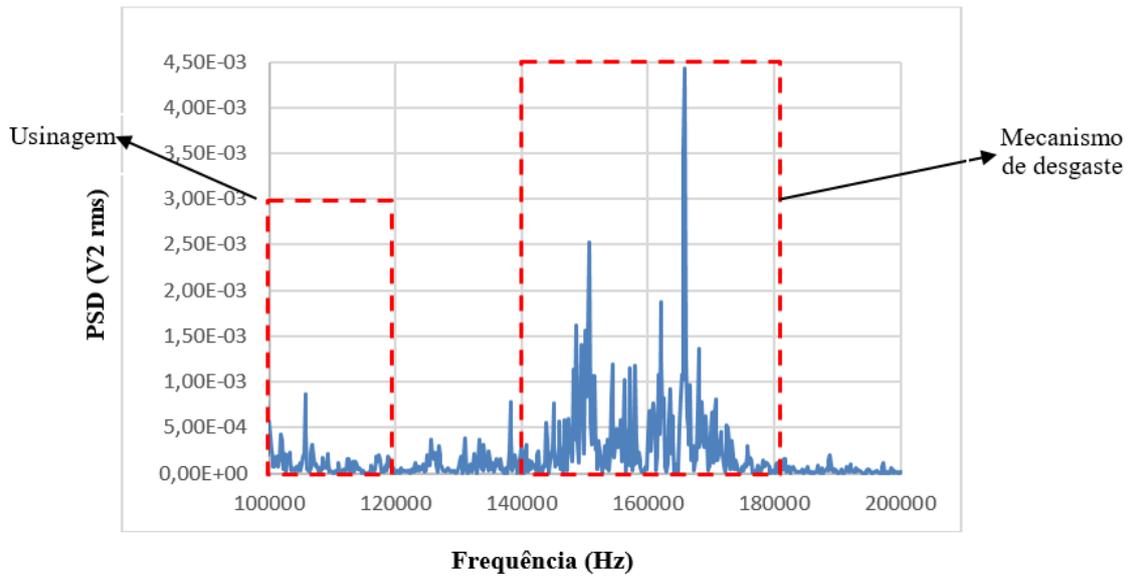
Para a medição do coeficiente de atrito utilizou-se um Tribômetro da Microtest, model SMT-A/0100 – nº série B01100-19. Os valores de Rugosidade média ( $R_a$ ) das amostras foram estabelecidos de acordo com a norma ASTM G99-05 (2010). Os valores não excederam 0,8  $\mu\text{m}$  e foram coletados por meio do software Nanovea Tribometer. A carga normal aplicada foi de 5 N e a velocidade de deslizamento foi de 64,62 m/min. A distância de deslizamento foi de 150 m. Os testes foram realizados sob condição a seco e à temperatura ambiente.

### 3. Resultados e Discussões

Nesta seção foram discutidos os principais resultados acerca do trabalho. A figura 2 mostra o sinal de EA para a  $v_c = 125$  m/min e  $f = 0,3$  mm/rev, para o inserto sem revestimento. Por meio da figura 2 pode-se observar que os maiores picos foram obtidos entre 140 e 180 kHz. Sugerindo os mecanismos de desgaste por adesão, deformação plástica e elástica. Pode-se observar também a amplitude do fenômeno de usinagem do material. Outros tipos de mecanismos de desgaste podem ter ocorrido durante a usinagem porém, em faixas de frequências em que o sensor de EA utilizado não foi possível coletar.

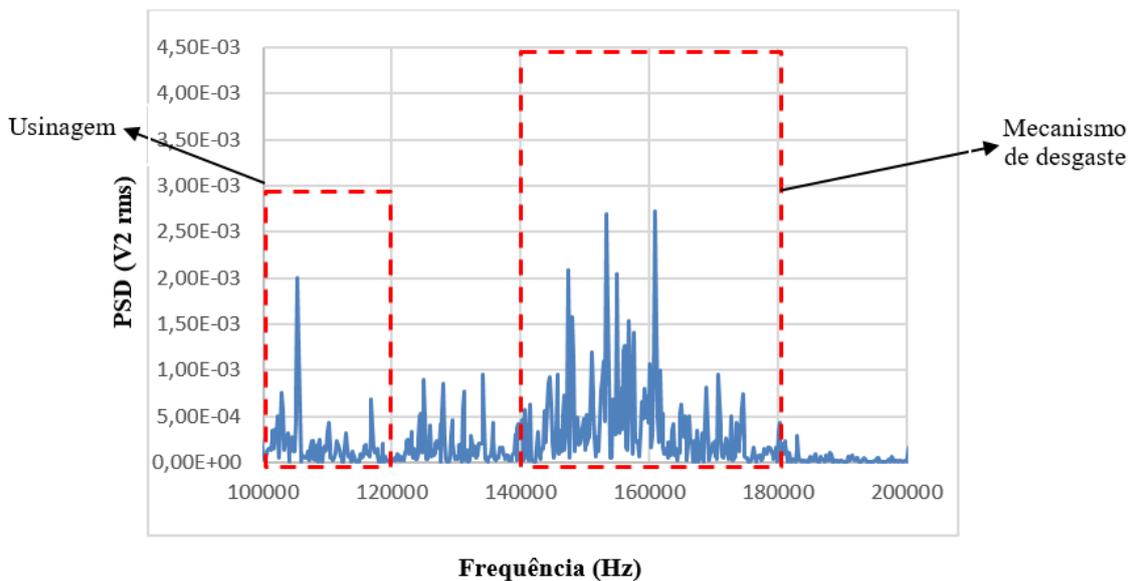
De acordo com as Figura 2 e 3, pode-se observar que para a ferramenta com revestimento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foram obtidos sinais com faixas de frequências similares ao da ferramenta sem revestimento, porém as amplitudes dos sinais para os mecanismos de desgaste, apresentaram menor intensidade na ferramenta revestida, o que levaria a redução da força de atrito na interação entre os materiais e conseqüentemente favoreceria o cisalhamento do material e o menor desgaste da aresta de corte da ferramenta.

Figura 2 – Sinal de emissão acústica para a  $v_c= 125$  m/min e  $f= 0,3$  mm/rev, para o inserto sem revestimento



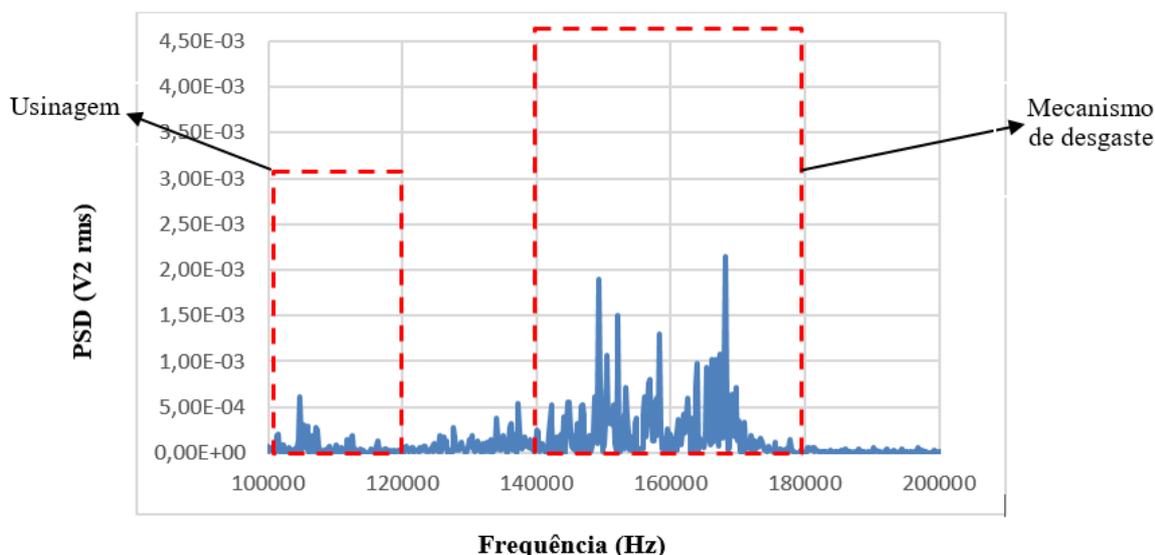
A figura 3 mostra o sinal de EA para a  $v_c= 125$  m/min e  $f = 0,3$  mm/rev, para o inserto com revestimento de  $Al_2O_3$ .

Figura 3 – Sinal de emissão acústica para a  $v_c= 125$  m/min e  $f= 0,3$  mm/rev, para o inserto com revestimento de  $Al_2O_3$ .



A figura 4 mostra o sinal de emissão acústica para a  $v_c= 125$  m/min e  $f = 0,3$  mm/rev, para o inserto com revestimento multicamadas. A mesma tendência observada para o inserto com revestimento de  $Al_2O_3$  foi verificada para o inserto com multicamadas. As maiores amplitudes foram observadas nas mesmas faixas de frequências, porém com menor intensidade, o que é justificado pela variação da força de atrito do par tribológico ferro fundido vermicular e as ferramentas utilizadas no trabalho.

**Figura 4 – Sinal de emissão acústica para a  $v_c= 125$  m/min e  $f= 0,3$  mm/rev, para o inserto com revestimento de  $Al_2O_3$  e  $TiO_2$  multicamadas.**



A tabela 4 resume os valores de coeficiente de atrito encontrados para as ferramentas utilizadas. Os defeitos no gráfico aparecem primeiramente quando se utiliza o pino sem revestimento, comparado aos pinos com revestimentos sol-gel. Esse resultado justifica a contribuição dos revestimentos para uma boa resistência ao desgaste. Além disso, os coeficientes de atrito na região de transição para os pinos com revestimento multicamadas e  $Al_2O_3$  são ligeiramente inferiores aos apresentados para o pino sem revestimento. Essa diferença está relacionada à modificação dos pinos após os revestimentos. Além disso, durante o teste, as propriedades de atrito aumentam gradualmente em direção a um nível conhecido como coeficiente de atrito estabilizado. O período de transição é mais longo na presença dos revestimentos multicamadas e  $Al_2O_3$ . Esse fato justifica a contribuição dos revestimentos sol-gel e comprova a melhoria do comportamento de desgaste dos pinos revestidos.

**Tabela 4 – Valores de coeficientes de atrito entre os pares avaliados**

Par Tribológico	$\mu$ (estágio transiente)	$\mu$ (estágio estacionário)
CGI - WC	0,34	0,39
CGI – $Al_2O_3$	0,32	0,37
CGI - $TiO_2$ e $Al_2O_3$	0,31	0,37

Fonte: Os autores (2020)

#### 4. Conclusões

Por meio do trabalho desenvolvido, pode-se concluir que a utilização de revestimentos em ferramentas de corte sugere uma redução da força de atrito durante a usinagem, o que contribui para a modificação da intensidade dos sinais de EA. Com relação à utilização do inserto de metal duro sem revestimento obteve-se maiores amplitudes de EA, o que indica uma maior força de atrito. Por outro lado, com a utilização de revestimentos, obteve-se menores amplitudes de energia, confirmando que para este caso, as forças de atrito entre o ferro fundido vermicular e os revestimentos utilizados ( $Al_2O_3$  e  $TiO_2+Al_2O_3$ ) foram menores. As ferramentas revestidas indicaram um menor desgaste, contribuindo para a redução dos custos de fabricação relacionados à usinagem de materiais como o ferro fundido vermicular.

## 5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Da mesma forma, os autores gostariam de agradecer às agências de fomento CNPQ e FAPEMIG pelo apoio na realização deste trabalho.

## Referências

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook: Surface Engineering**. 10 ed., v.5, 1994.

ASM International. **Volume 1 Properties and Selection: Irons Steel and High Performance Alloys**. 10 ed., 1990.

ASTAKHOV, V. P. **Tribology of Metal Cutting**. 1 ed. Great Britain: Elsevier, 2006

ASTM G99-05. **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**, 2010.

BRINKER, C. J.; SCHERER, G. W. **Sol-gel Science: The Physics and Chemistry of Sol Gel Processing**. London: Academic Press, 1990.

DAI, W. X.; CHEN, X.; LI, E.; WANG, X. X.; LIU, P.; FU, X. Z. Influence of pH value of TiO<sub>2</sub> sol on surface gloss of corresponding TiO<sub>2</sub> film coated on ceramic tiles. **Surface Engineering**, v. 25, n. 2, p. 106-110, 2009.

GUESSER, W. L. **Propriedade Mecânica dos Ferro Fundidos**. 1 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

KALPAKJIAN, S.; SCHIMD, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2010.

KALPAKJIAN, S.; SCHIMD, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2013.

LI, X. A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring during Turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol.42, pp. 157-165. 2002.

MACHADO, A. R., COELHO, R.T., ABRÃO, A.M, DA SILVA, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3 ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MACWAN, D. P.; DAVE, P. N.; CHATURVEDI, S. A review on nano-TiO<sub>2</sub> sol–gel type syntheses and its applications. **Journal of Materials Science**, v. 46 p. 3669–3686, 2011.

MAIA, L. H. A. **Avaliação de desempenho de recobrimentos em ferramentas de metal duro no torneamento do aço ABNT 4340 temperado por meio de sinais de emissão acústica**. Belo Horizonte, 2015. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

MATTOX, D. M. **Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing**. 2 ed. Oxford: Elsevier, 2010.

SOUSA, T. A.; PAULA, M. A.; KONATU, R. T.; RIBEIRO, M. V.; CAMPOS, E.; SOUZA, J. V. C. Investigation of the performance of ceramic tools of alumina doped with magnesium oxide in the dry machining of compacted graphite iron. **Materials Research Express**, v. 6, 046546, p. 1-12, 2019.

TUPY, 2018. Disponível em:

<[http://www.tupy.com.br/portugues/produtos/automotivos\\_motor.php?subpage=latMotorBloco](http://www.tupy.com.br/portugues/produtos/automotivos_motor.php?subpage=latMotorBloco)> Acesso em 08 de agosto de 2018.

WRIGHT, J. D.; SOMMERDIJK, N. A. J. M. **Sol-Gel Materials**: Chemistry and Applications. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2001.

YANG, S.; ZHANG, Y.; MO, D. Spectroscopic ellipsometry studies of sol-gel-derived Cu-doped ZnO thin films. **Thin Solid Films**, v. 571, p. 605-608, 2014.

YUAN, H., WANG, C.Y., GUO, Y., ZHENG, L.J., 2014. Research progress on the processing of compacted graphite cast iron. **Mach. Tools Hydraul.** 13, 162 - 167.