

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CÂMPUS PONTA GROSSA

TIALIN BARBOZA

DETERMINAÇÃO DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE FERRAMENTAS DE CORTE  
REVESTIDAS VIA TÉCNICA FOTOACÚSTICA DE CÉLULA ABERTA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA  
2018

TIALIN BARBOZA

DETERMINAÇÃO DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE FERRAMENTAS DE CORTE  
REVESTIDAS VIA TÉCNICA FOTOACÚSTICA DE CÉLULA ABERTA

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de  
diplomação em Bacharelado de Engenharia Mecânica.  
Prof. Orientadora: Daniele Toniolo Dias Ferreira Rosa.

PONTA GROSSA  
2018



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Ponta Grossa  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Mecânica  
Bacharelado em Engenharia Mecânica



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**DETERMINAÇÃO DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE FERRAMENTAS DE CORTE  
REVESTIDAS VIA TÉCNICA FOTOACÚSTICA DE CÉLULA ABERTA**

por

**TIALIN BARBOZA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 22 de junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dra. Daniele Toniolo Dias Ferreria Rosa**

**Orientadora**

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho**

**Membro Titular**

**Prof. Dr. Aldo Braghini Junior**

**Membro Titular**

**Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares**

**Responsável pelos TCC**

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de  
Carvalho**

**Coordenador do Curso**

– O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

*Em memória de minha avó, Verônica Barboza,  
que sempre torceu pelas minhas conquistas.  
Saudades eternas.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus e a meus pais, Gilson e Tânia, pelas oportunidades que me foram dadas em toda minha vida. A minha irmã Thainá e minha noiva Keila, pelo suporte, pela força nos momentos ruins e por sempre torcerem e acreditarem em mim.

Agradeço a minha orientadora, Prof. Dra. Daniele T. Dias pela confiança, paciência, dedicação, ensinamentos e pela oportunidade do trabalho em conjunto, desde o projeto de iniciação científica até a realização do presente trabalho de conclusão de curso. Sem sua compreensão este trabalho não seria possível.

Também agradeço ao técnico laboratorista do LAPTO, Adagil Ferreira Rosa Jr. e à aluna de mestrado Regiane Drabeski pela ajuda e apoio fornecidos em inúmeros momentos de dificuldades no decorrer dos experimentos deste trabalho.

A Juliana Soares de Souza por ter dado início a esse campo de estudos em ferramentas de corte. Seu trabalho pioneiro na caracterização termo-óptica de ferramentas de metal duro trouxe inúmeras possibilidades para descobertas e pesquisas nesta área. Também a agradeço por sempre compartilhar de suas experiências em laboratório quando eu era aluno da iniciação científica.

Ao técnico laboratorista do Departamento de Mecânica e mestrando, Eriel Biagini Sabino, por ser sempre prestativo, por sua preocupação e incentivo, bem como no importante suporte prestado na preparação das amostras, na caracterização via EDS das mesmas e no ensaio de nanoidentificação realizado nos laboratórios da Universidade Estadual de Ponta Grossa por intermédio do professor Dr. Gelson B. de Souza.

Ao professor Dr. Aldo Braghini Junior, pelo interesse nesta pesquisa, apoio técnico e pelo fornecimento das amostras para a realização do trabalho.

Minha gratidão será eterna a todos que me auxiliaram na realização desse trabalho. Que Deus os abençoe imensamente.

## RESUMO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados no mundo. Consiste na remoção do material através do contato entre uma ferramenta de corte e a peça a ser usinada. Tal contato gera grandes quantidades de calor, exigindo um fluido refrigerante para a remoção desse calor. Porém, este fluido tem-se mostrado prejudicial quando levado em conta as questões ambientais. Dessa forma, aprimoramentos vêm sendo realizados para a realização da usinagem a seco, ou seja, sem uso de fluidos refrigerantes. Para que tais avanços sejam possíveis, é necessário o estudo das propriedades térmicas das ferramentas de corte. O presente trabalho realiza a medição da difusividade térmica via técnica célula fotoacústica aberta de revestimentos de ferramentas de corte de metal duro. Foram analisadas duas amostras de fabricantes diferentes denominadas X e Y. O revestimento da amostra X apresentou uma difusividade térmica de  $(0,62 \pm 0,08) \text{ cm}^2/\text{s}$ . Por outro lado, o valor para a difusividade térmica do revestimento da amostra Y mostrou-se indeterminado devido a espessura desta camada ser muito fina. Em adição, foi possível diferenciar a propagação de calor entre estas duas amostras mediante análise da composição química dos revestimentos usando microscopia eletrônica de varredura, bem como a dureza do substrato e do revestimento via nanoidentação.

Palavras-chave: OPC, usinagem, metal duro, revestimento, MEV, dureza

## **ABSTRACT**

*Machining is one of the most widely used manufacturing processes in the world. It consists of the removal of material through the contact between a cutting tool and the part to be machined. Such contact generates large amounts of heat, requiring a refrigerant fluid to remove this heat. However, such a fluid has proved detrimental when taken into account environmental issues. In this way, improvements have been made to perform the dry machining, that is, without the use of refrigerant fluids. For such advances to be possible, it is necessary to study the thermal properties of cutting tools. The present work performs the thermal diffusivity measurement using open photoacoustic cell technique of hardmetal cutting tool coatings. Two samples from different manufacturers named X and Y were analyzed. The X-sample coating had a thermal diffusivity of  $(0.62 \text{ cm}^2 / \text{s} \pm 0.08) \text{ cm}^2 / \text{s}$ . On the other hand, the value for the thermal diffusivity of the Y-sample coating was shown to be undetermined because the thickness of this layer was thinner. In addition, it was possible to differentiate the heat propagation between the samples by analyzing the chemical composition of the coatings using scanning electron microscopy, as well as the hardness of the substrate and the coating by nanoindentation.*

*Key-words: OPC, machining, hardmetal, coating, SEM, hardness*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – ESQUEMA DE CÉLULA FOTOACÚSTICA. ....	16
FIGURA 2 - ESQUEMA DA CÉLULA FOTOACÚSTICA ABERTA (OPC). ....	18
FIGURA 3 – REGIÕES DE GERAÇÃO DE CALOR .....	20
FIGURA 4 - EVOLUÇÃO DO GRADIENTE DE TEMPERATURA APÓS 70s DE USINAGEM. ....	22
FIGURA 5 - MONTAGEM EXPERIMENTAL DE OPC. ....	24
FIGURA 6 - DETERMINAÇÃO DA REGIÃO QUE SEGUE O MODELO PARA OPC. ....	29
FIGURA 7 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE "B" (EQUAÇÃO 5). ....	30
FIGURA 8 - ESPESSURA DO REVESTIMENTO DA AMOSTRA X.....	32
FIGURA 9 - ESPESSURA DO REVESTIMENTO DA AMOSTRA Y.....	33
FIGURA 10 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AMOSTRA X.....	34
FIGURA 11 - ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NA AMOSTRA X.....	34
FIGURA 12 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AMOSTRA Y .....	35
FIGURA 13 - ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES NA AMOSTRA Y.....	36
FIGURA 14 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO REVESTIMENTO DA AMOSTRA X.....	38
FIGURA 15 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DAS AMOSTRAS (FABRICANTE Y).....	40
FIGURA 16 - ENSAIO DE NANOIDENTAÇÃO AMOSTRA X.....	41
FIGURA 17 – ENSAIO DE NANOIDENTAÇÃO AMOSTRA Y.....	42

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 PROCESSO DE USINAGEM.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 USINAGEM A SECO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.3 FERRAMENTA DE CORTE.....</b>	<b>12</b>
<b>2.4 REVESTIMENTO DE FERRAMENTAS DE CORTE DE METAL DURO.....</b>	<b>13</b>
<b>2.5 DIFUSIVIDADE TÉRMICA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.6 ESPECTOSCOPIA FOTOACÚSTICA .....</b>	<b>15</b>
<b>2.7 TÉCNICA FOTOACÚSTICA DE CÉLULA ABERTA .....</b>	<b>17</b>
<b>2.8 CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRA DE DUAS CAMADAS.....</b>	<b>19</b>
<b>2.9 GERAÇÃO DE CALOR NO ATO DE CORTE.....</b>	<b>20</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 O SISTEMA DE CÉLULA FOTOACÚSTICA ABERTA – OPC .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA.....</b>	<b>25</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 DIFUSIVIDADES EFETIVAS .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.1 TRATAMENTO DOS DADOS.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.2 DIFUSIVIDADE TÉRMICA EFETIVA.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1.3 MEV E DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 DIFUSIVIDADE TÉRMICA DAS CAMADAS .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3 ENSAIO DE DUREZA.....</b>	<b>41</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A época conhecida como revolução industrial culminou em grandes avanços quanto as técnicas de fabricação. Um exemplo deste avanço é a invenção da máquina térmica. Conseqüentemente ocorreu uma ampliação da gama de materiais utilizados nos mais diferentes tipos de construção. Na maioria das aplicações em que era utilizada a madeira, passaram a ser empregados ferros fundidos, latão, bronze e aço carbono, iniciando o advento da usinagem (ALVES e OLIVEIRA, 2007).

Neste contexto, surgiu a necessidade da criação de ferramentas de corte mais elaboradas, que pudessem atender satisfatoriamente a usinabilidade dos mais diferentes materiais, evitando quebras, desgastes excessivos e obtendo bons acabamentos superficiais. Contudo, tem-se buscado a modernização do processo a fim de atender um mercado cada vez mais competitivo economicamente e preocupado com questões ambientais (MONARO e HELLENO, 2010). Por esses motivos, medidas são adotadas para que haja redução nos custos e na geração de resíduos dos processos de fabricação.

Para isso, a atenção tem sido bastante voltada quanto ao uso de fluidos de corte, sendo a sua redução ou ausência um dos principais pontos para uma usinagem mais limpa. Durante o uso do fluido de corte na usinagem o mesmo sofre degradação. Um dos fatores que afetam a vida do fluido de corte é o crescimento de bactérias e a geração de levedura o que caracteriza também riscos ao meio ambiente. Ao chegar em uma condição de desuso se faz necessário o descarte do fluido de corte, sendo esta eliminação de elevado custo para empresa e de riscos significativos ao meio ambiente e a saúde do trabalhador. (ALVES e OLIVEIRA, 2007).

Devido a esses aspectos de ordem ambiental e econômico estudos têm sido realizados para a aplicação de usinagem sem fluido de corte, conhecida como usinagem a seco (RODRIGUES, et al, 2017). A usinagem a seco significa que o processo de usinagem será executado com ausência total de refrigeração e lubrificação por meio de fluidos de corte. O que garante relevante redução nos custos. O descarte de fluidos de corte é sujeito a rigorosas regulamentações, seu tratamento e uma disposição final inadequada, acarreta problemas ambientais além de gerar elevado custo à empresas.

No entanto há grande dificuldade em se empregar a usinagem a seco, devido à elevada temperatura de usinagem, o que acarreta num severo desgaste na

superfície do inserto. Apesar do excesso de calor ser o principal fator para a diminuição da vida da ferramenta de corte, é preciso que ela desempenhe a função de dissipar calor originado na interface com a peça de trabalho. Para isso, se faz necessário que o inserto tenha boa condutibilidade térmica, capaz de manter um gradiente de temperatura estável em seu interior.

O estudo da dissipação de calor em insertos de metal duro requer metodologias avançadas capazes de avaliar a condução de calor em diferentes camadas do material.

A descoberta do efeito fotoacústico por Alexander Graham Bell, aliado ao surgimento de microfones e lasers possibilitou, em meados da década de 1970, as teorias de estudos em sólidos e a ascensão da Espectroscopia Fotoacústica (ROSENCWAIG, 1980). O efeito fotoacústico pode ser observado, modulando um feixe de luz, ou laser, sob uma amostra o que provoca seu aquecimento. O calor gerado é difundido e segundo Preece (1881) causa contração e expansão na camada de gás em contato com a amostra. Além disso, Mercadier (1881) indicou também a vibração desta camada. Com estas medidas, é possível a caracterização de propriedades ópticas e térmicas, como a difusividade térmica.

A difusividade térmica é uma propriedade específica de cada material, que relata o quão rapidamente o calor se propaga ocasionando mudanças de temperatura no material (GOMES et al, 2016). Tal dado é essencial para conhecer as propriedades de resfriamento e aquecimento de um material, relacionar a condução de calor com mudanças estruturais, além de ser essencial para solucionar a Equação Diferencial de Fourier para a condução de calor (OLIVEIRA et al, 2015).

Ao analisar a usinagem em ação, pode-se perceber que há uma geração de calor muito intensa entre o material que está sendo usinado e a ferramenta que está realizando o corte. Tendo isto em vista, ao tentar aprimorar a vida útil das ferramentas, os parâmetros de usinagem e as técnicas de resfriamento, o conhecimento da difusividade térmica se torna essencial.

Este trabalho de conclusão de curso se propõe a determinar a difusividade térmica dos revestimentos e substratos de duas ferramentas de corte de uma mesma aplicação, porém de fabricantes diferentes, através da espectroscopia fotoacústica, adotando a técnica de célula fotoacústica aberta (OPC).Conseqüentemente este trabalho apresenta uma análise das possíveis diferenças de condução térmica entre

revestimento e substrato e também a comparação das mudanças estruturais (microscópicas) e mecânica (dureza) entre os insertos de dois fabricantes.

Os resultados encontrados e discussões sugeridas podem ser utilizados futuramente para a determinação da influência da difusividade térmica na vida útil das ferramentas de corte, sendo isso de interesse direto de qualquer usuário destas ferramentas.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Determinar a difusividade térmica do revestimento de duas ferramentas de corte de fabricantes diferentes, porém de mesma classe destinadas ao fresamento.

### 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Utilizar a técnica de célula fotoacústica aberta para a caracterização termo-óptica das amostras;
- Caracterizar os insertos microestruturalmente usando a técnica complementar de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Analisar a dureza do revestimento e do substrato das amostras via nanoindentação;

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 PROCESSO DE USINAGEM

Um processo de fabricação consiste na transformação da matéria prima em produto acabado através da aplicação de diferentes métodos e técnicas. Um dos principais processos é o chamado de usinagem.

A usinagem basicamente consiste em uma operação de remoção de material através de esforços mecânicos, proporcionando forma, dimensões, acabamento e/ou a combinação desses. Tal remoção de material é realizada por uma ferramenta de corte específica e o material retirado chama-se cavaco (COSTA, 2006).

Dentro desse contexto é importante ressaltar os estudos em busca dos avanços de produtividade, eficiência, acabamento e geometria inseridos na usinagem, sendo esses os grandes desafios de pesquisa desta área.

Outro fator que se tornou de suma importância ao decorrer dos últimos anos para a indústria e os processos de fabricação foi a questão da preocupação ambiental. Tal questão vem sendo colocada no topo das discussões empresariais e governamentais para a redução do consumo de energia elétrica, da geração de resíduos e contaminações das mais variadas formas (ALVES e OLIVEIRA. al, 2007).

Portanto, como a usinagem é aplicada em uma escala global de fabricação, este processo também recebeu atenção relacionada ao aspecto ambiental e um dos resultados desta conscientização foi a elaboração da usinagem a seco.

### 2.2 USINAGEM A SECO

Fluídos de corte, são líquidos ou gases aplicados em usinagem, na ferramenta ou na peça a fim de reduzir atrito, dissipar calor e expulsar o cavaco. Webster (1995) cita os quatro principais tipos de fluidos de corte: óleo integral, emulsão, fluidos semi-sintéticos e fluidos sintéticos.

Segundo El Baradie (1996) a utilização destes fluidos no processo de usinagem acarreta no prolongamento da vida útil da ferramenta de corte, uma vez que o material da ferramenta possui dureza elevada e baixa taxa de difusão de calor.

Fluídos de corte se tornaram em muitos processos essenciais para a obtenção de produtividade e acabamentos elevados, sendo em muitos deles, indispensáveis.

Porém, uma análise aprofundada sobre os fluidos de corte, considerando o aspecto ecológico e ocupacional, revela que os mesmos são uma fonte agressora ao meio ambiente e causadora de problemas de saúde, como problemas de pele e variantes respiratórias (ZEILMANN, 2007).

Tendo isso em vista, foram encontradas duas alternativas a este problema: a usinagem a seco, e a mínima quantidade de lubrificante (MQL).

A usinagem a seco, como o próprio nome diz, não utiliza nenhum tipo de fluido (além do ar) durante o processo de remoção do material. Ou seja, aparentemente apresenta o melhor custo benefício, haja vista que, não há custos com fluidos de corte. Porém, esta alternativa se mostra eficaz apenas em aplicações específicas, onde acabamentos superficiais severos não são requisitados.

A MQL é o tipo de usinagem que utiliza o mínimo possível de fluido para atingir alguma necessidade do projeto. Ou seja, casos em que a usinagem a seco não pode ser utilizada, procura-se a redução ao máximo da quantidade de fluido, sendo então, a MQL um elo de ligação entre a usinagem a seco e a usinagem convencional (que usa abundância de fluido) (CASTRO, 2001).

### 2.3 FERRAMENTA DE CORTE

É a ferramenta de corte quem realiza a remoção do cavaco. Isso pode ocorrer através do movimento da própria ferramenta, como no processo de fresamento e furação, ou com a ferramenta estática e a rotação da peça a ser usinada como no processo de torneamento.

A maior geração de calor dentro do processo de usinagem ocorre no contato da ferramenta de corte com a peça sendo usinada, ou seja, no ato do corte do material, pois é nesse local que ocorre as maiores forças de atrito, havendo destaque para as zonas de cisalhamento e conseqüentemente a geração de calor. É visando esse local que os fluidos de corte são empregados.

Para que o corte e conseqüentemente a remoção de cavaco aconteça, necessita-se que o material empregado na ferramenta seja mais duro que o da peça a ser usinada. Ou seja, para cada tipo de material a ser usinado existe uma gama de ferramentas que podem atender ou não à requisição do corte.

Ferramentas de corte são então construídas com variados tipos de material. Segundo DINIZ, *et. al*, 2008, os seguintes materiais são empregados:

- Aços-rápidos
- Metal duro
- Cerâmica de corte
- Nitreto de boro cúbico
- Diamante

A ferramenta de corte ideal deve ter as seguintes características (MODERN METAL CUTTING, 1994):

- Ter alta dureza, resistência ao desgaste de flanco e deformações plásticas;
- Ter alta tenacidade para resistir a choques e quebras;
- Ser quimicamente inerte com o material a ser usinado e resistir em altas temperaturas ao desgaste por oxidação e difusão (craterização);
- Ter boa resistência a choques térmicos.

A característica da ferramenta escolhida influenciará diretamente em sua vida útil, na escolha da máquina, tempos de fabricação, custo do operador, entre outros fatores (HEISEL, 2007).

Para cada tipo de operação existem diversos parâmetros diferentes a serem analisados e, sendo assim, há uma grande variedade de tipos de ferramenta de corte.

## 2.4 REVESTIMENTO DE FERRAMENTAS DE CORTE DE METAL DURO

Ao final da década de 60, observou-se que revestir uma ferramenta de corte de metal duro com uma fina camada de nitreto de titânio traz um grande equilíbrio de dureza e tenacidade para a ferramenta na aplicação em cortes com especificações mais exigentes (MODERN METAL CUTTING, 1996).

A partir disso o aumento da vida útil das ferramentas de corte teve grande crescimento (SUBRAMANIAN, 1993).

Nos dias de hoje, metal duro revestido aparece entre 80 a 90% de todas as pastilhas para ferramenta de corte. Seu sucesso como um material da ferramenta deve-se ao equilíbrio entre dureza, tenacidade e dissipação de calor.

Essa combinação de metal duro e revestimento criou então uma nova classe dentro das ferramentas de corte (MODERN METAL CUTTING, 1996)

Os materiais de revestimento de ferramentas mais utilizados são (CASTRO, 2001 e MODERN METAL CUTTING, 1996):

- Carboneto de titânio (TiC);
- Nitreto de titânio (TiN);
- Óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>);
- Carbonitreto de titânio (TiCN);
- Nitreto de titânio e alumínio (TiAlN);
- Bissulfeto de molibdênio (MoS<sub>2</sub>).

## 2.5 DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A difusividade térmica ( $\alpha$ ) é uma propriedade intrínseca do material e descreve o quão rapidamente o calor se difunde pelo mesmo.

Essa propriedade é utilizada para determinar taxas e formas de aquecimento e resfriamento de materiais e sistemas. Sua unidade no CGS é de cm<sup>2</sup>/s e pode ser obtida através da Equação (1):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}, \quad (1)$$

em que  $k$  = condutividade térmica,  $\rho$  = massa específica e  $c_p$  = calor específico.

A obtenção desta propriedade térmica é também fundamental para a resolução da equação diferencial de Fourier para a condução instável do calor. Determinar a difusividade térmica de uma ferramenta de corte pode, por exemplo, auxiliar na decisão de sua utilização, ou não, no processo de usinagem a seco.

Uma importante observação se deve ao fato da difusividade térmica ser um parâmetro único de cada material, sendo a mesma influenciada diretamente pela forma da rede cristalina, bem como a densidade e defeitos microestruturais.

## 2.6 ESPECTOSCOPIA FOTOACÚSTICA

O inventor do telefone, Alexander Graham Bell descobriu, em 1880, ao testar seu fofone, o efeito fotoacústico. Ao modular a incidência solar com sua própria voz em um sólido com forma de diafragma em contato com um tubo, o mesmo notou que o fofone reproduzia um som audível.

Em 1881, Lord Rayleigh afirmou: “A fonte primeira do sinal fotoacústico em discos finos e flexíveis é dada por sua vibração mecânica como consequência do aquecimento desigual gerado ao ser iluminado periodicamente”.

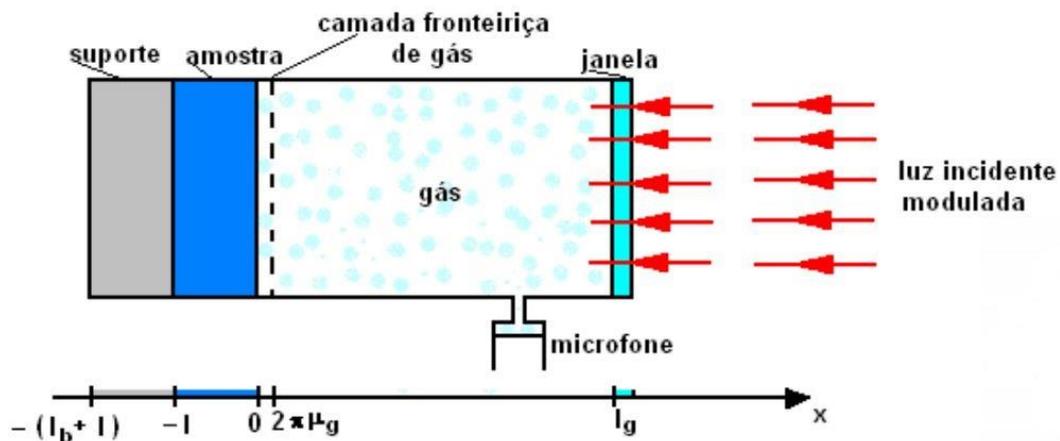
A explicação do efeito fotoacústico em sólidos é dada pelo modelo matemático proposto por Rosencwaig e Gersho (R-G) e trata da difusão térmica, um dos principais mecanismos do sinal fotoacústico para sólidos.

Um feixe de luz é pulsado, através de uma janela de vedação transparente, sob uma amostra que está no interior de uma câmara preenchida com gás, o qual, devido a modulação da luz e da variação da temperatura, gera ondas acústicas que podem ser captadas por um microfone acoplado à câmara. A Figura 1 mostra um esquema de como é montada a célula fotoacústica.

O sinal fotoacústico pode ser gerado por três mecanismos principais:

- Difusão térmica: a luz modulada sob a amostra é convertida em calor, que é transmitido a uma fina camada do gás, expandindo-o e formando uma onda acústica, então captada pelo microfone.
- Expansão térmica: a variação da temperatura média da amostra através do aquecimento via absorção, ocasiona a expansão e contração da mesma induzidas pela modulação do feixe de luz, gerando ondas acústicas.
- Efeito termoelástico: quando a amostra está presa por suas extremidades, o gradiente de temperatura formado ao longo de sua superfície, gera uma expansão diferenciada ao longo de seus planos perpendiculares, sendo esse um processo periódico, há a geração de ondas acústicas.

Figura 1 – Esquema de célula fotoacústica.



Fonte: DIAS, D. T.

A amostra pode ser classificada de acordo com seus parâmetros ópticos e térmicos. O parâmetro óptico (de absorção) é o comprimento de absorção óptico  $L_\beta$  que é a distância percorrida pela radiação na amostra até atingir  $1/e$  da intensidade incidente. Segundo este parâmetro a amostra é caracterizada em termos de três casos: amostra opticamente opaca quando  $L_\beta$  é  $\ll$  que a espessura da amostra; amostra absorvedora quando  $L_\beta$  é  $\approx$  a espessura da amostra; e amostra opticamente transparente quando  $L_\beta$  é  $\gg$  que a espessura da amostra. Para classificar a amostra de acordo com um parâmetro térmico, observa-se que a transmissão de calor periódica pode ser analisada através do comprimento de difusão térmica  $\mu_s$  que é dado pela Equação (2):

$$\mu_s = \sqrt{2\alpha/\omega}, \quad (2)$$

em que  $\alpha$  é a difusividade térmica da amostra;  $\omega = 2\pi f$  e  $f$  é a frequência de modulação da luz incidente.

Portanto, a amostra pode ser classificada como termicamente grossa quando  $\mu_s$  é menor que a espessura da amostra ( $L_s$ ) ou como termicamente fina quando  $\mu_s$  é maior que a espessura  $L_s$ .

A dependência de  $\mu_s$  com a frequência de modulação permite a análise de perfil de profundidade e a amostra pode passar de termicamente fina para termicamente

grossa aumentando-se a frequência. Esta passagem é definida pela frequência de corte  $f_c$ , dado pela Equação 3:

$$f_c = \frac{\alpha}{\pi L_s} \quad (3)$$

em que  $\alpha$  = difusividade térmica e  $L_s$  = espessura da amostra.

## 2.7 TÉCNICA FOTOACÚSTICA DE CÉLULA ABERTA

A técnica fotoacústica de célula aberta foi proposta por Da Silva *et al* (1987) sendo essa a técnica indicada para o estudo de amostras sólidas com incidência traseira, ou seja, o sinal fotoacústico é gerado na superfície posterior a que sofre a incidência do feixe. Uma das grandes vantagens da técnica de célula fotoacústica de célula aberta (OPC) segundo Da Silva *et al* (1987) é o baixo custo do microfone de eletreto de volume mínimo.

Nesta técnica, a amostra serve como vedação da câmara fotoacústica contendo um gás. Ao receber a luz modulada e a mesma ser convertida em calor, a variação de temperatura da amostra resulta uma variação na pressão do gás. Como se trata de uma indução modulada, a mesma gera o sinal fotoacústico.

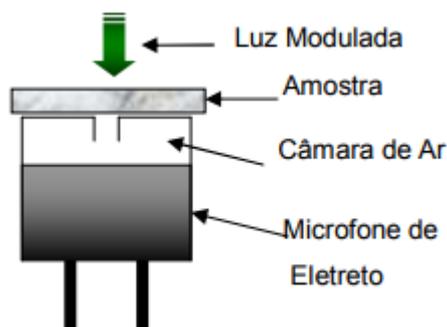
Quando é o mecanismo de difusão térmica que predomina para a geração do sinal fotoacústico ( $S_f$ ), o modelo R-G prevê que:

$$S_f = \frac{\gamma P_0}{L_g \sigma_g T_0} \theta(0) e^{j\psi_f}, \quad (4)$$

em que  $\sigma_g$  = coef. complexo de difusão térmica do gás,  $P_0$  = pressão média,  $T_0$ =temperatura média,  $L_g$  = espessura do gás,  $\gamma = C_p/C_v$  é a razão entre os calores específicos a pressão e a volume constantes,  $\psi_f$ =fase do sinal e  $\theta(0)$ =flutuação de temperatura na interface amostra-gás.

Um modelo esquemático da OPC pode ser visto na Figura 2:

**Figura 2 - Esquema da célula fotoacústica aberta (OPC).**



Fonte: Da Silva, E. N, 2005.

A luz modulada pode ser uma lâmpada, um laser ou alguma outra fonte de radiação.

Para uma amostra térmicamente grossa ( $\mu_s \gg L_s$ ) e opaca ( $L_\beta \ll L_s$ ) o sinal  $S_f$  gerado para cada frequência segue a Equação (5):

$$S_f = \frac{A}{f} \exp(-b\sqrt{f}). \quad (5)$$

O valor da difusividade térmica é obtido fazendo o ajuste da equação (4), sabendo a espessura do material, uma vez que:

$$b = \sqrt{\frac{\pi * L_s^2}{\alpha}}, \quad (6)$$

em que  $\alpha$  é a difusividade térmica e  $L_s$  é a espessura da amostra.

O microfone utilizado para a pesquisa foi um microfone de eletreto extremamente simples, sendo que suas vantagens são seu custo, fácil instalação e operação. Em contrapartida este tipo de microfone não é linear para todas as frequências. Portanto, para ser possível a sua utilização para frequências moduladas, o mesmo necessita de uma curva de resposta que é dada pela Equação (7):

$$\bar{\chi} = |\chi^* \chi|^{1/2} = \frac{\omega \tau_E}{[1 + (\omega \tau_E)^2]^{1/2}} \quad (7)$$

Em que  $\tau_E = RC$ , sendo R a resistência e C a capacitância.

## 2.8 CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRA DE DUAS CAMADAS

A técnica de célula fotoacústica aberta se mostra muito intuitiva e direta ao caracterizar e analisar amostras de materiais homogêneos. Porém, ao se deparar com uma amostra que contém mais de uma camada, de materiais diferentes, a análise das mesmas sofre a adição de passos adicionais.

Ao se deparar com uma amostra com duas camadas, como é o caso do presente trabalho, onde a amostra contém a camada do substrato e a do revestimento, a obtenção da difusividade térmica individual das camadas exige o conhecimento das espessuras de cada camada da amostra, bem como o valor da difusividade térmicas de uma delas. Para isso faz-se o corte da amostra a modo de deixar apenas uma das camadas e obtém-se o valor da difusividade térmica desta camada.

Neste trabalho, a amostra é constituída pelas camadas do substrato e do revestimento. Entretanto, o valor da difusividade térmica do substrato de cada ferramenta selecionada é conhecido, sendo este dado disponível em SOUZA, J. S (2016).

Considerando L1 e D1 como a espessura e a difusividade térmica, respectivamente da camada do revestimento e L2 e D2 como a espessura e a difusividade térmica, respectivamente, da camada do substrato, e utilizando da analogia entre as resistências térmicas e elétricas usadas nos problemas de transferência de calor (MACHADO, 2007), é possível definir a difusividade térmica de um sistema de duas camadas como (MANSANARES, et al. 1990):

$$D_s = \left[ \frac{x^2}{D_1} + \frac{(1-x)^2}{D_2} + x(1-x) \left( \frac{\lambda}{D_1} + \frac{1}{\lambda D_2} \right) \right]^{-1}, \quad (8)$$

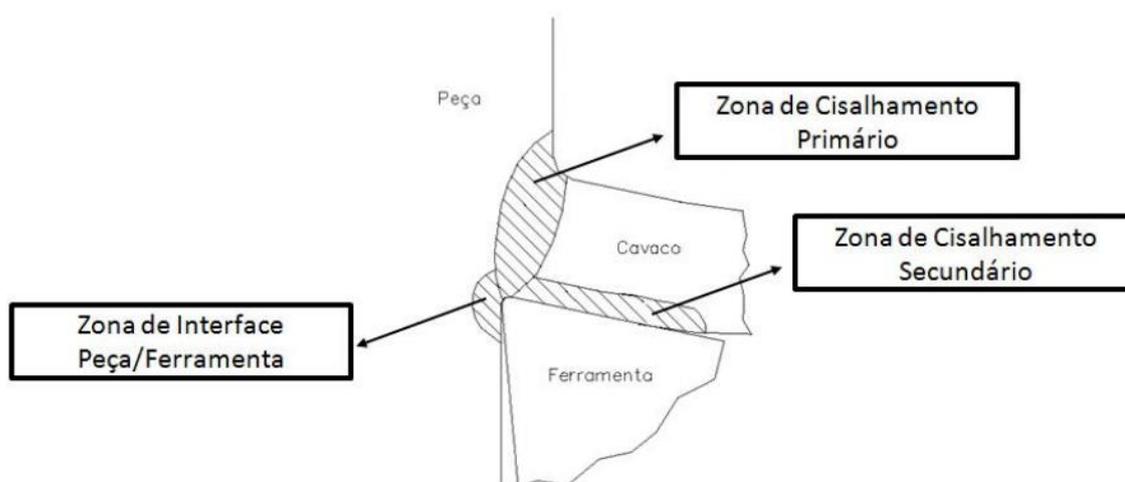
em que  $x = L1/(L1+L2)$  que é a fração da espessura do substrato na amostra composta,  $\lambda=k1/k2$  que é a fração das condutividades térmicas das amostras e  $Ds$  é a difusividade térmica efetiva da amostra composta.

Portanto, sabendo a difusividade térmica do substrato é possível obter esta propriedade térmica para o revestimento. A obtenção de cada valor não conhecido dentro da equação (8) pode ser determinado usando o ajuste da curva de um gráfico, onde o eixo Y é denotado com os valores das difusividades térmicas efetivas da amostra específica em diferentes espessuras e o eixo X é tomado com os valores da fração da espessura do substrato.

## 2.9 - GERAÇÃO DE CALOR NO ATO DE CORTE

Para uma análise mais completa dos resultados obtidos, é preciso entender a geração de calor no ato do corte. Para cada tipo de corte, existem zonas de geração de calor máximo, sendo que para metais existem três regiões de geração de calor, definidas como zona de cisalhamento primário, zona de cisalhamento secundário e zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009), que podem ser visualizadas na Figura 3.

**Figura 3 – Regiões de geração de calor**



Fonte: MACHADO *et al.*, 2009

Segundo Machado *et al.* (2009), a zona de cisalhamento secundário é a principal fonte de calor responsável pelas altas temperaturas da ferramenta de corte, principalmente quando da usinagem de materiais duros e de alto ponto de fusão (aços, titânio, ligas de níquel, por exemplo). A temperatura na zona de fluxo depende da quantidade de trabalho realizado para cisalhar o material e da quantidade de material que passa pela mesma.

O calor gerado na zona de cisalhamento primário é dissipado em cerca de 75% pelo cavaco e uma pequena parte é transmitida por condução para a peça. Tal parte não deve ser desprezada, já que pode ocasionar erros de dimensionamento da peça.

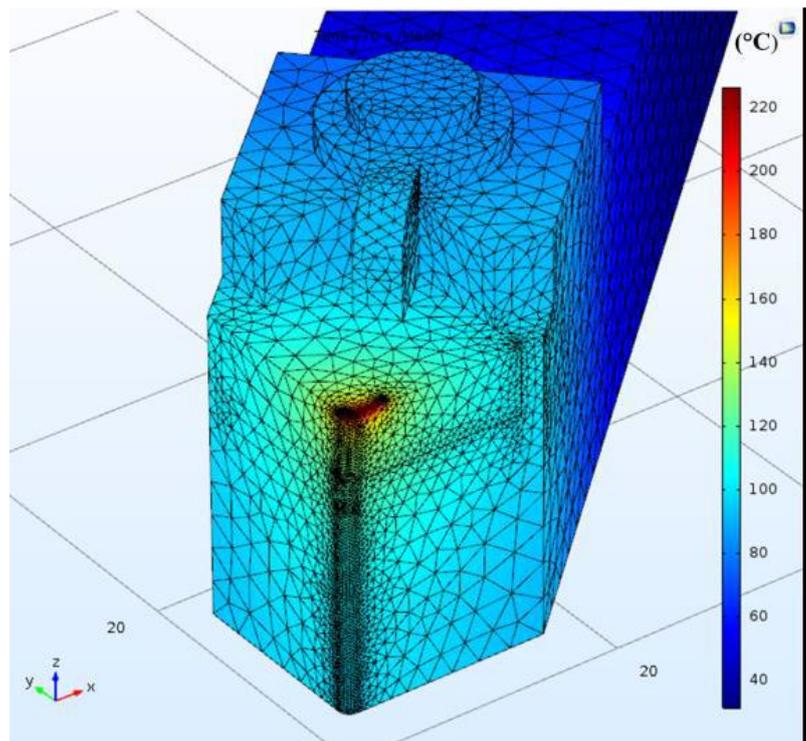
A zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta pode se tornar uma importante fonte de calor para a ferramenta quando se usina com pequenos ângulos de folga ou com ferramentas com desgastes consideráveis (TRENT, 1984).

Diversos métodos para simulação e medição das temperaturas de corte vem sendo desenvolvidos, porém poucos traduzem fielmente os reais acontecimentos do ato de corte.

A partir do momento que o calor entra na ferramenta, a mesma tende a dissipar isso através de seu contato com a peça, calço e porta-ferramenta.

Uma simulação computacional feita por Ferreira (2017) do gradiente de temperatura na ferramenta, calço e porta ferramentas pode ser vista na Figura 4 e mostra a maneira que o calor se comporta na ferramenta de corte.

**Figura 4 - Evolução do gradiente de temperatura após 70s de usinagem.**



Fonte: Ferreira, 2017.

Uma primeira análise que deve ser feita, é de que toda a ferramenta é revestida. Sendo assim, a distribuição de calor é definida pelo revestimento da ferramenta de corte, e nesse sentido, o revestimento é quem dita a difusão do calor. Khajezadeh, Akhlaghi e Razfar (2014) estudaram a influência do revestimento em ferramentas de metal duro durante a usinagem e os resultados mostraram que a temperatura para as ferramentas de corte revestidas tem o mesmo comportamento que a temperatura para a ferramenta não revestida. Porém, a taxa de decaimento da temperatura ao longo da espessura da ferramenta de corte é maior para as ferramentas revestidas.

Puls, Klocke e Vaselevac (2016) desenvolveram, baseado na técnica dos elementos finitos, um modelo de simulação para verificar a forma com que a geração de calor é dividida durante a usinagem a seco de um material, usando ferramentas revestidas. Os resultados mostraram que diferentes propriedades termofísicas dos materiais utilizados no revestimento da ferramenta de corte não tem grande influência na taxa de calor que é transferida para a peça, mas sim na taxa de calor que é transferida para a ferramenta de corte.

Ou seja, as propriedades termofísicas influenciam diretamente na dispersão do calor para os suportes das ferramentas, bem como o meio em que a ferramenta está inserida.

Desta forma, propriedades térmicas que permitam uma melhor dispersão do calor nos revestimentos das ferramentas tendem a fornecer melhores condições de trabalho para cortes realizados a seco, sendo fundamental na aplicabilidade dos mesmos.

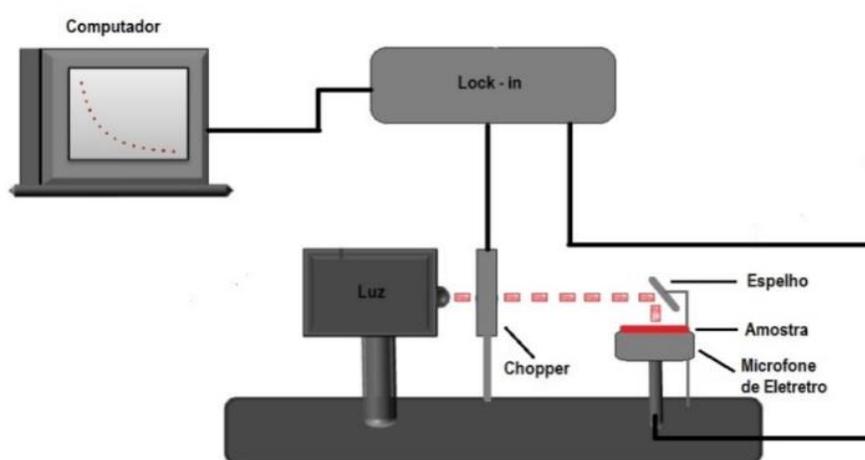
### 3 METODOLOGIA

Nesta seção, serão abordadas as técnicas para a determinação das propriedades desejadas, bem como a preparação das amostras.

#### 3.1 O SISTEMA DE CÉLULA FOTOACÚSTICA ABERTA – OPC

A montagem experimental para a realização da técnica pode ser conferida na Figura 5:

**Figura 5 - Montagem experimental de OPC.**



Fonte: SOUZA, J. S., (2016)

A amostra é colada sob uma célula conforme esquema da Figura 2. A amostra sofre incidência de uma luz (laser de estado sólido 637 nm, 25 mW da Coherent modelo Radius) modulada por um *chopper* (da Stanford Research Systems modelo SR540). O microfone então envia o sinal para o *lock-in* (amplificador também da Stanford Research Systems modelo SR840) que repassa este sinal via RS-232 para o computador. Um programa de linguagem *python* plota o gráfico Frequência de modulação X Sinal Fotoacústico. Posteriormente é determinada experimentalmente a curva de resposta para o microfone usando uma amostra de alumínio termicamente fina. Usando o modelo matemático de difusão térmica a difusividade térmica para a amostra pode ser obtida.

### 3.2 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Foram utilizadas cinco amostras de insertos comerciais comumente utilizados de dois fabricantes diferentes, sendo aqui as amostras diferenciadas por Amostra X e Amostra Y e as espessuras são especificadas na Tabela 1.

**Tabela 1 - Espessuras das amostras.**

ESPESSURAS (micrometros)		
AMOSTRA N°	AMOSTRA X	AMOSTRA Y
1	520	710
2	580	800
3	950	900
4	1065	1000
5	1440	1100

Fonte: Autor, 2018.

Cada ferramenta de corte foi seccionada na máquina de corte de precisão BUEHLER modelo IsoMet 4000, disco de corte de diamante de 15HC e 4000 rpm, localizada no laboratório de metalografia da UTFPR-PG.

Após o corte, a amostra foi posicionada sobre a câmara fotoacústica. Para isso é necessário fazer um isolamento nas bordas da câmara com graxa de silicone para evitar que haja ar entre a amostra e a entrada da câmara.

### 3.3 TÉCNICAS COMPLEMENTARES

#### 3.3.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As imagens em MEV foram obtidas no Laboratório de Metalografia da UTFPR – câmpus Ponta Grossa usando um equipamento da TESCAN (VEGA 3). Uma análise semi-quantitativa da amostra pode ser realizada por espectroscopia de energia dispersiva (EDS), acoplado ao MEV com intuito de analisar os elementos químicos que compõem o revestimento e substrato das amostras. Tal análise foi feita na região

de transição do substrato para o revestimento da amostra, obtendo assim, os dados das duas regiões da amostra.

### 3.3.2 NANOINDENTAÇÃO

Os dados relativos a dureza das amostras, tanto dos substratos quanto dos revestimentos foram obtidos através da utilização do nanoindentador (modelo UNAT da ASMEC) que faz parte do Complexo de Laboratório Multiusuários (C-LabMu) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

Foram realizadas duas medições tanto para o substrato quanto para o revestimento, sendo estas submetidas a uma correção. A correção consistiu em ajustar o ponto inicial de contato da ponta com a amostra, visto que a rugosidade dificultou sua determinação automática. O método foi o ajuste da curva pela equação de Hertz.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são mostrados os valores encontrados da difusividade térmica efetiva de cada amostra, bem como o ajuste de curva para obtenção da difusividade do revestimento, a análise microestrutural dos insertos, bem como o ensaio de dureza e uma discussão baseada na empregabilidade das ferramentas de corte.

### 4.1 DIFUSIVIDADES EFETIVAS

#### 4.1.1 TRATAMENTO DOS DADOS

As leituras presentes no arquivo importado são dispostas em três colunas, sendo a coluna “A” referente a frequência de modulação da luz e a coluna “B” o sinal do microfone.

O tratamento do sinal do microfone (coluna B) como descrito pela Equação (7) será inserido na coluna “C”, como segue na Tabela 2 tipicamente para a amostra X número 3:

Tabela 2 – Disposição dos dados

Frequência (Hz)	Sinal	S/qui (u.a)	Freq. ^ 0,5	Freq*(s/qui)
A	B	C	D	E
5,08	5,44E-04	0,00497	2,25	0,02525
6,06	4,74E-04	0,00364	2,46	0,02202
7,07	4,13E-04	0,00272	2,66	0,01925
8,06	3,65E-04	0,00212	2,84	0,01707
9,13	3,23E-04	0,00166	3,02	0,01519
10,13	2,91E-04	0,00136	3,18	0,01374
11,13	2,64E-04	0,00113	3,34	0,01252
12,11	2,43E-04	9,56E-04	3,48	0,01158
13,09	2,25E-04	8,22E-04	3,62	0,01076
14,16	2,06E-04	7,01E-04	3,76	0,00992
15,16	1,92E-04	6,14E-04	3,89	0,00931
16,15	1,80E-04	5,42E-04	4,02	0,00875
17,15	1,69E-04	4,82E-04	4,14	0,00827
18,14	1,58E-04	4,31E-04	4,26	0,00782
19,17	1,50E-04	3,88E-04	4,38	0,00745
20,15	1,42E-04	3,54E-04	4,49	0,00713
21,18	1,35E-04	3,22E-04	4,60	0,00683
22,16	1,29E-04	2,95E-04	4,71	0,00655
23,17	1,23E-04	2,72E-04	4,81	0,0063
24,16	1,17E-04	2,51E-04	4,91	0,00606
25,17	1,12E-04	2,33E-04	5,02	0,00587

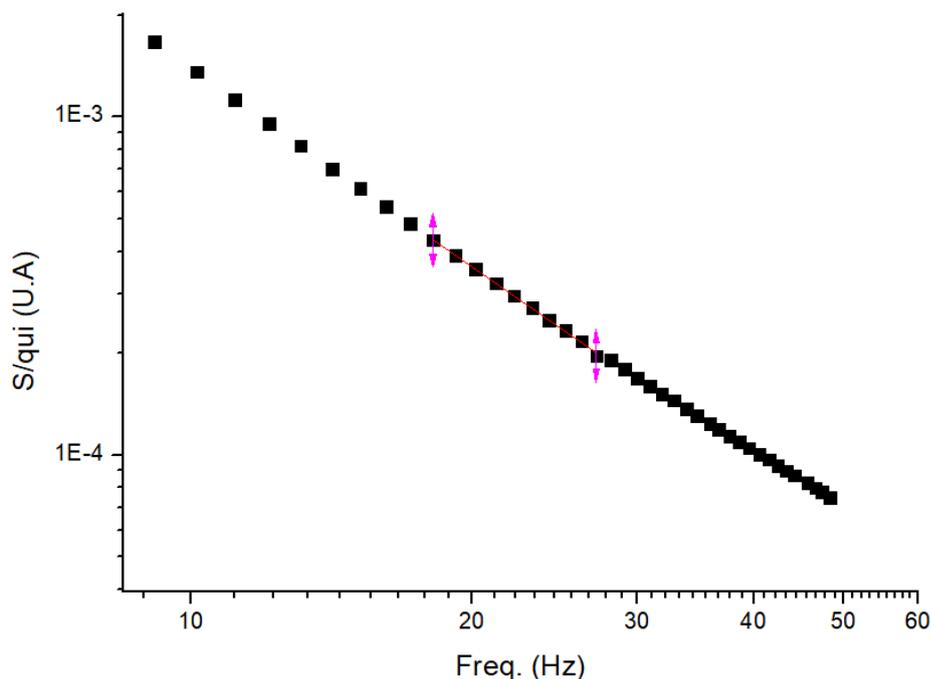
Fonte: Autor, 2018

As colunas “D” e “E” estão os dados da raiz quadrada da frequência e o sinal corrigido multiplicado pela frequência, respectivamente.

Para a obtenção do coeficiente **b**, expresso na Equação (6), são necessárias duas etapas: determinação da região em que o sinal fotoacústico se comporta conforme o modelo R-G para uma amostra termicamente grossa e opaca.

Conforme Figura 6, tipicamente para a amostra X número 3, a determinação desta região é verificada pela plotagem do sinal corrigido (coluna “C”) no eixo X e da frequência (coluna “A”) no eixo Y, sendo ambos os eixos em escala de Log10.

**Figura 6 - Determinação da região que segue o modelo para OPC.**



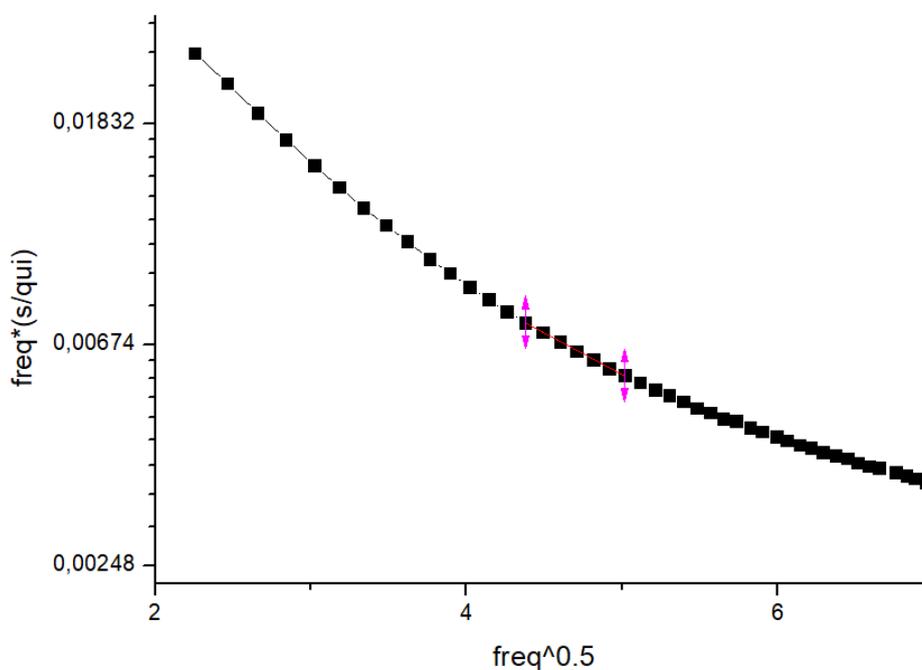
Fonte: Autor, 2018

A partir do gráfico gerado, deve se encontrar a região em que o ajuste linear seja igual, ou o mais próximo possível, de  $f^{-1.5}$  (Rosencwaig e Gersho, 1976), ou seja, onde o ajuste linear tende ao valor de -1,5. Observa-se nesta amostra que este comportamento compreende o range de frequências de modulação entre 18Hz a 28Hz.

Para determinação do coeficiente  $b$  (Equação 6) foi gerado um novo gráfico, que pode ser visualizado na Figura 7, tipicamente para a mesma amostra da Figura 6, sendo o eixo Y composto pelos dados da frequência multiplicada pelo sinal corrigido (coluna "E" da Tabela 2) na escala ln e o eixo X composto pela raiz quadrada da frequência, representada pela coluna "D" da Tabela 2.

Dentro do range de frequências de modulação pré-estabelecido, é realizado um ajuste linear, e o valor do coeficiente angular deste ajuste determina o coeficiente  $b$  (Equação 6).

**Figura 7 - Determinação do coeficiente "b" (Equação 5).**



Fonte: Autor, 2018

Em posse do valor do coeficiente **b** e da espessura da amostra, é possível, usando a Equação (6) determinar a difusividade térmica da amostra analisada.

#### 4.1.2 DIFUSIVIDADE TÉRMICA EFETIVA

Os primeiros valores que foram obtidos dizem respeito a difusividade térmica efetiva de cada amostra. Ou seja, a efetividade do conjunto substrato mais revestimento. Estes resultados posteriormente serão dispostos na equação da difusividade térmica de duas camadas (Equação 7) para determinação da difusividade térmica da camada do revestimento.

A Tabela 3 mostra os valores encontrados via técnica de célula fotoacústica aberta para cada amostra, sendo os valores aqui apresentados uma média entre duas medições realizadas no laboratório.

**Tabela 3 - Resultados obtidos**

<b>Amostra</b>	<b>Espessura (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>coeficiente b</b>	<b><math>\alpha_{\text{efetiva}}</math> (<math>\text{cm}^2/\text{s}</math>)</b>
X	520	0,12 +/- 0,02	0,57 +/- 0,04
	580	0,15 +/- 0,02	0,44 +/- 0,04
	950	0,35 +/- 0,01	0,23 +/- 0,03
	1065	0,41 +/- 0,03	0,21 +/- 0,05
	1490	0,61 +/- 0,02	0,19 +/- 0,04
Y	710	0,35 +/- 0,01	0,13 +/- 0,03
	800	0,35 +/- 0,01	0,16 +/- 0,02
	900	0,33 +/- 0,02	0,24 +/- 0,03
	1010	0,36 +/- 0,01	0,25 +/- 0,02
	1110	0,46 +/- 0,02	0,18 +/- 0,03

Fonte: Autor, 2018.

Os resultados da Tabela 3 mostram uma discrepância entre os resultados para a difusividade térmica das amostras X e Y. Enquanto na amostra X os valores de  $\alpha$  diminuem com o aumento da espessura, na amostra Y os valores sofrem uma pequena variação, sem apresentar um padrão para o mesmo.

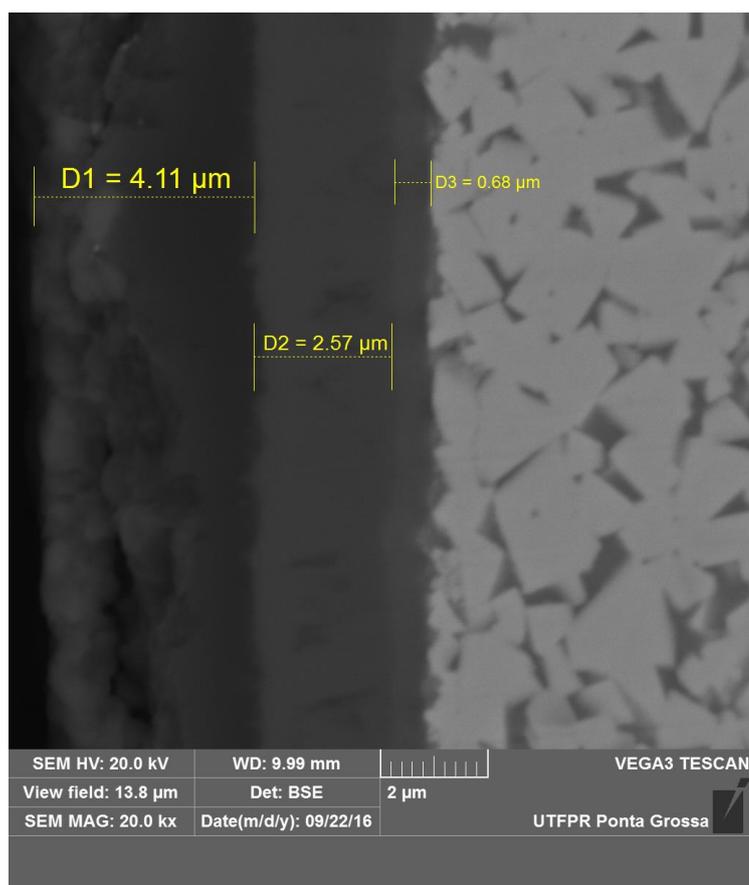
#### 4.1.3 MEV E DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA

As amostras analisadas neste estudo são compostas de duas camadas, sendo uma delas o substrato da ferramenta, composta por carbonetos de tungstênio e a outra o revestimento da ferramenta, composta por óxido de alumínio, nitreto de titânio entre outros.

É de fundamental importância para este estudo o conhecimento das espessuras das camadas das amostras utilizadas. Para a obtenção deste valor, foi necessária a análise de cada amostra através do MEV (microscópio eletrônico de varredura). É importante ressaltar que estas foram feitas na região do revestimento da amostra, pois

ao determinar-se a espessura do revestimento é possível a determinação da espessura do substrato pela diferença entre a espessura total da amostra. A Figura 8 mostra a imagem capturada via MEV para definir a espessura do revestimento da amostra X.

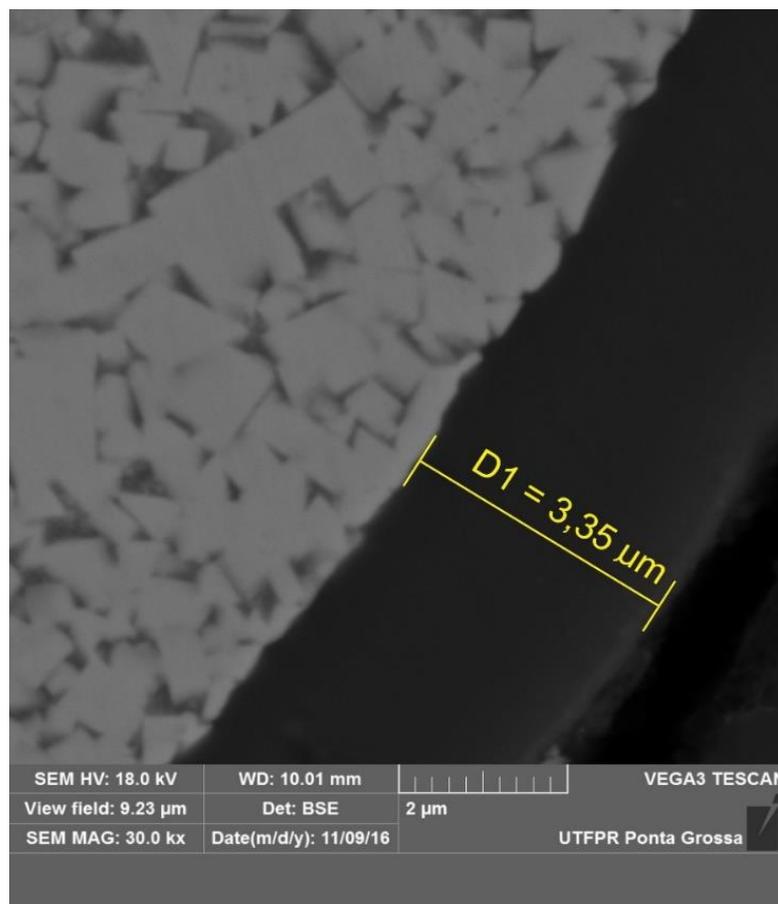
**Figura 8 - Espessura do revestimento da amostra X.**



Fonte: Autor, 2018.

Sabendo-se que a região mais clara se trata do substrato da amostra (SOUZA, 2016), é possível identificar as regiões mais escuras como sendo o revestimento da mesma. Sendo assim, com auxílio de software gráfico, é possível via comparação de escalas, determinar a espessura da região do revestimento, sendo que esta amostra apresenta uma espessura de aproximadamente 7,36 μm, composta por três camadas ( $D_1=4,11 \mu\text{m}$ ;  $D_2=2,57 \mu\text{m}$ ; e  $D_3=0,68 \mu\text{m}$ ), onde  $D_3$  sugere ser uma região de transição entre o substrato e o revestimento.

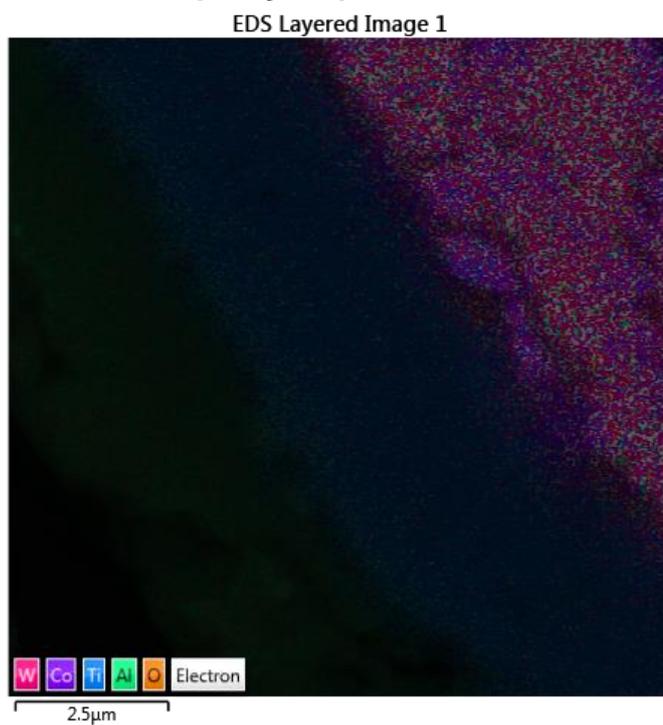
Para a amostra Y realizou-se a mesma análise, como visto na Figura 9.

**Figura 9 - Espessura do revestimento da amostra Y.**

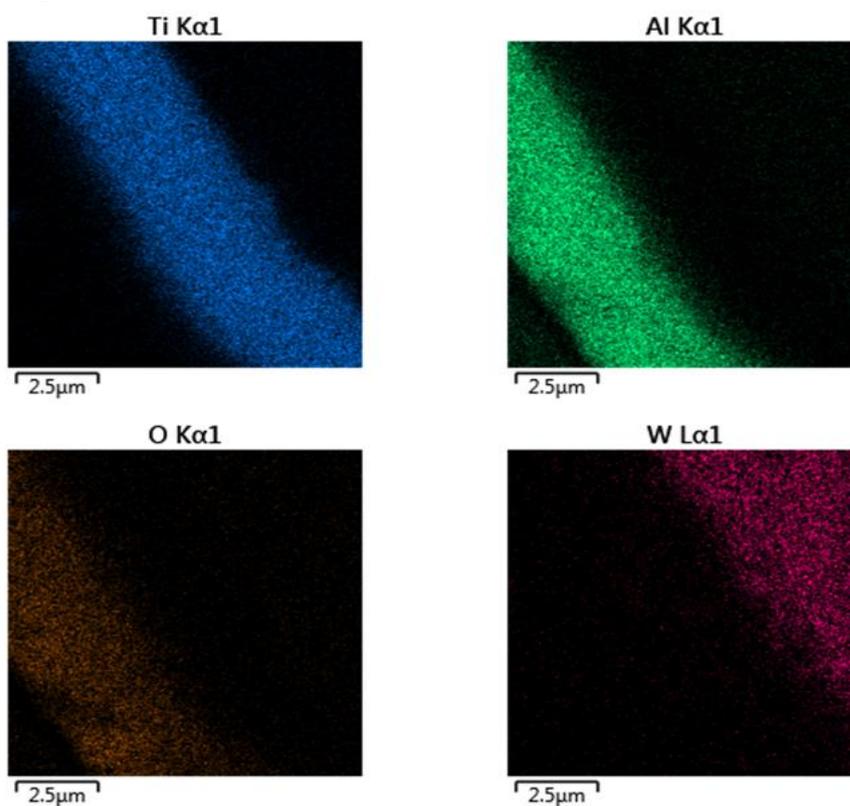
Fonte: Autor, 2018.

A amostra Y tem espessura de revestimento de apenas 3,35  $\mu\text{m}$  preparada em uma única camada, sendo essa aproximadamente a metade da espessura do revestimento da amostra X.

Em adição, usando o EDS acoplado ao MEV foi possível realizar a identificação dos elementos químicos presentes em cada amostra, sendo tal dado dotado de grande importância para comparação entre a constituição química de cada revestimento e sua difusividade térmica. Nas Figuras 10 e 11 é possível ver a análise via EDS para a amostra X.

**Figura 10 – Composição química da amostra X**

Fonte: Autor, 2018.

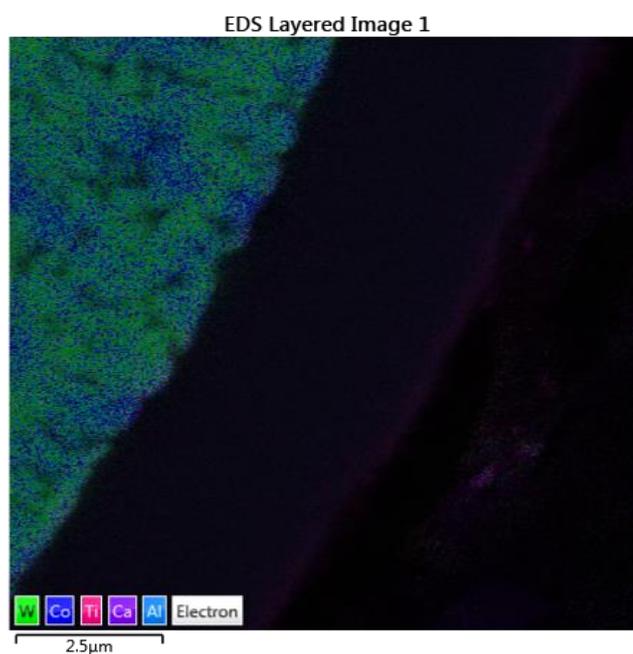
**Figura 11 - Elementos químicos presentes na amostra X**

Fonte: Autor, 2018.

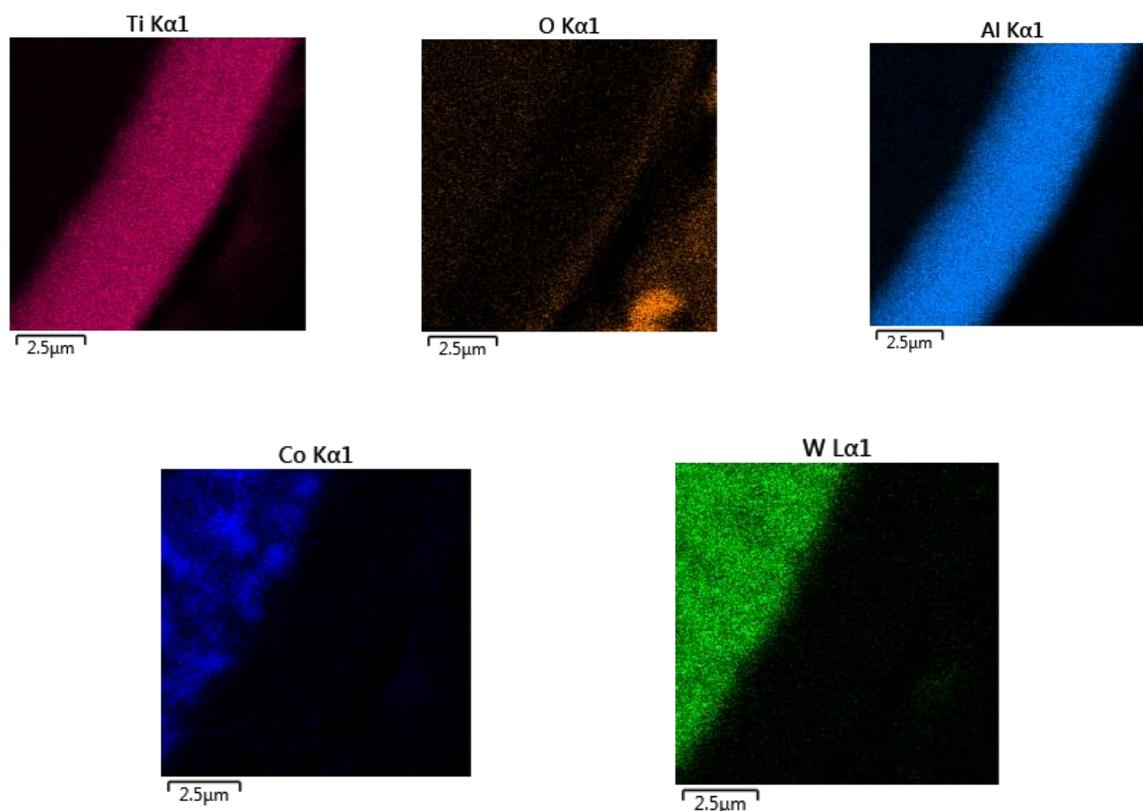
É possível assim dizer que o revestimento desta amostra é constituído pelos elementos químicos titânio, alumínio e oxigênio. O tungstênio faz parte do substrato da amostra. A Figura 10 indica também uma pequena presença de cobalto no substrato da amostra.

Nas Figuras 12 e 13 segue a análise via EDS para a amostra Y.

**Figura 12 - Composição química da amostra Y**



Fonte: Autor, 2018.

**Figura 13 - Elementos químicos presentes na amostra Y**

Fonte: Autor, 2018.

A distribuição química do revestimento da amostra Y se mostra diferente da outra amostra. É importante ressaltar a distribuição dos elementos na camada do revestimento. Diferente do encontrado na amostra X, onde haviam camadas definidas para o titânio, oxigênio e o alumínio, aqui encontra-se uma camada única e homogênea para os elementos químicos. O substrato mostra a presença de cobalto além de tungstênio.

A influência das diferenças observadas nas distribuições químicas das duas amostras, na condução de calor poderá ser analisada e discutida a partir da obtenção dos resultados da difusividade térmica para cada camada.

## 4.2 DIFUSIVIDADE TÉRMICA DAS CAMADAS

SOUZA, 2016, apresenta valores de difusividade térmica do substrato das mesmas ferramentas analisadas neste trabalho, que podem ser vistos na Tabela 4:

**Tabela 4 – Difusividade térmica do substrato.**

Amostra	Difusividade térmica (cm <sup>2</sup> /s)
X	0,194+/-0,007
Y	0,263+/-0,009

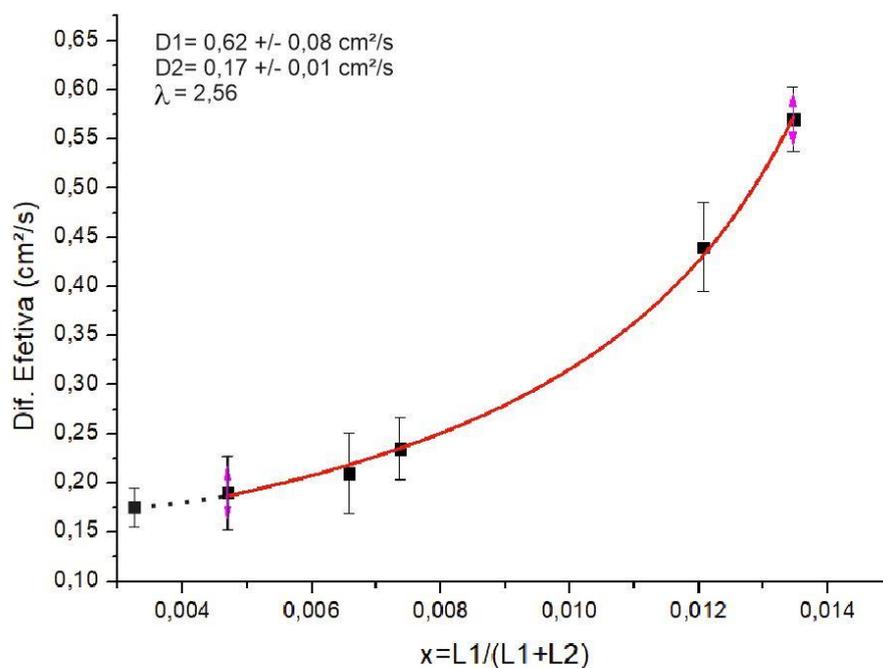
Fonte: SOUZA, J. S. (2016)

SOUZA, et al. associaram a diferença da difusividade térmica para o substrato da amostra Y em 36% maior que a amostra X (Tabela 4) à microestrutura mais refinada encontrada na disposição dos grãos da amostra Y em comparação a amostra X e ao metal duro da amostra Y que apresentou uma intensidade 56% maior das fases de CO<sub>2</sub>(Co)<sub>8</sub>. Também pode-se associar as diferenças qualitativas em relação aos níveis de cobalto encontrados via varredura EDS.

Com os valores das espessuras das camadas e das difusividades térmicas efetivas da Tabela 3 é possível a obtenção dos valores da difusividade térmica do revestimento de cada ferramenta usando o ajuste de curva via Equação 8.

A Figura 14 apresenta o gráfico correspondente para todas as amostras do fabricante X, e os valores de difusividade térmica efetiva de cada amostra em função da razão da espessura do revestimento pela espessura total da amostra (revestimento + substrato) onde as linhas sólidas representam o ajuste com a Equação (8). A linha pontilhada representa a Equação (8) para o caso em que L<sub>1</sub> = 0.

**Figura 14 – Difusividade térmica do revestimento da amostra X**



Fonte: Autor, 2018

O melhor ajuste de curva encontrado com a Equação 8 (linha sólida), com  $D1=D_{\text{revest}}$ ;  $D2=D_{\text{subs}}$ ; e  $\lambda=k_{\text{revest}}/k_{\text{subs}}$  como parâmetros ajustáveis, foi aquele em que se determinou o valor de **(0,62 +/- 0,08)  $\text{cm}^2/\text{s}$**  para a difusividade térmica efetiva do revestimento da amostra X. Este dado mostra que a difusão de calor que ocorre na superfície da ferramenta de corte, ocorre cerca de três vezes mais rápida do que a ocorre no substrato da ferramenta.

A Tabela 5 mostra a difusividade térmica, condutividade térmica, densidade e calor específico de diversos materiais, sendo assim possível uma comparação entre os valores obtidos experimentalmente para as difusividades térmicas das amostras e valores da literatura para diferentes metais.

Portanto, o valor encontrado experimentalmente está de acordo com valores da literatura para os materiais encontrados na região do revestimento.

**Tabela 5 - Propriedades térmicas e físicas de alguns materiais**

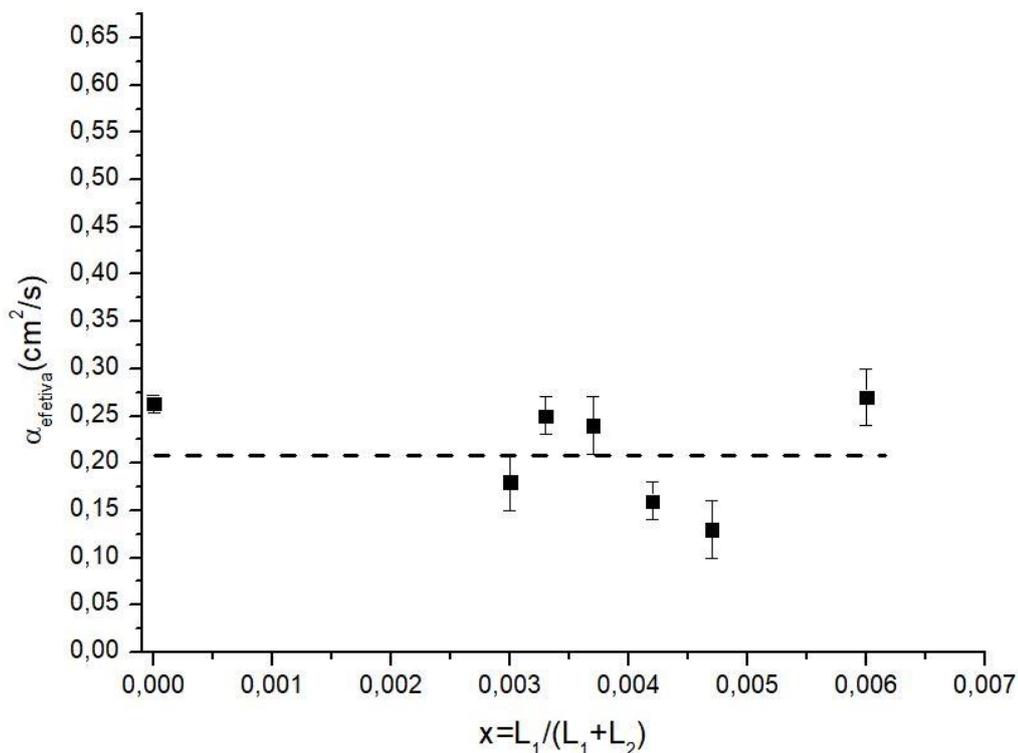
<b>Material</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor específico (J/(kg.K))</b>	<b>Condutividade térmica (W/(m.K))</b>	<b>Difusividade térmica (cm<sup>2</sup>/s)</b>
<b>Alumínio</b>	2700	945	238	0,9328
<b>Cobre</b>	8933	385	401	1,166
<b>Ferro</b>	7870	447	80,2	0,228
<b>Aço</b>	7832	434	63,9	0,188
<b>Tungstênio</b>	19300	132	174	0,683

Fonte: Adaptado de Almond *et. al.* (1996).

Nota-se na Figura 14 que a linha pontilhada representa o valor esperado para a difusividade térmica usando a Equação 7 quando somente o substrato compõe a amostra,  $L_1 = 0$ , sendo que o valor encontrado de  $(0,17 \pm 0,01)$  cm<sup>2</sup>/s está de acordo com a difusividade térmica do substrato da amostra X encontrado por SOUZA, 2016. Do mesmo ajuste de curva, é obtido o valor de  $\lambda = 2,56$  que corresponde ao valor da fração das duas condutividades térmicas. Conhecendo o valor da condutividade térmica de  $(20,7 \pm 0,02)$  W/mK de uma amostra sinterizada de Wc-10%pCo (5GPa/1300°C/2min), que possui difusividade térmica de  $(0,25 \pm 0,01)$  cm<sup>2</sup>/s (MACHADO, 2007) (SOUZA, 2016) encontra-se a condutividade térmica para o revestimento da amostra X de aproximadamente  $(53,0 \pm 0,9)$  W/mK, sabendo que  $\lambda = k_{revest}/k_{subs}$ . Este valor é da ordem de grandeza do aço, conforme Tabela 5.

Uma configuração gráfica igual é efetuada para os valores obtidos na amostra Y, como mostra a Figura 15:

**Figura 15 – Difusividade térmica efetiva das amostras (fabricante Y)**



Fonte: Autor, 2018

A amostra Y, assim como a amostra X é composta por duas camadas. Entretanto, a espessura da camada do revestimento da amostra Y é de cerca de 3,35  $\mu\text{m}$ , ou seja, menos da metade da espessura do revestimento da amostra X. Esta espessura é muito menor que a espessura total das amostras, como vistas na Tabela 1. Deste modo, a razão  $x=L_1/(L_1+L_2)$  é muito pequena. Ao utilizar a Equação 8 para a determinação da difusividade térmica de amostras de duas camadas, observa-se que para um valor de x muito pequeno, as difusividades térmicas efetivas passam a ter mesmas ordens de grandezas da camada 2, ou seja, da camada do substrato neste caso. Sendo assim, D1 (difusividade térmica do revestimento da amostra Y) passa a se tornar indeterminado. Para garantir a confiabilidade do intervalo de espessuras medido para a amostra Y, foi realizado um ensaio adicional para difusividade térmica de uma amostra de espessura 550 $\mu\text{m}$  ( $x=0,006$ ) e o valor encontrado para difusividade térmica foi de (0,27 +/- 0,03)  $\text{cm}^2\text{/s}$ , ou seja, próximo aos valores observados na Figura 15.

A diferença entre as duas amostras está diretamente atrelada à composição do revestimento de cada uma. Cada fabricante busca uma particularidade em seu

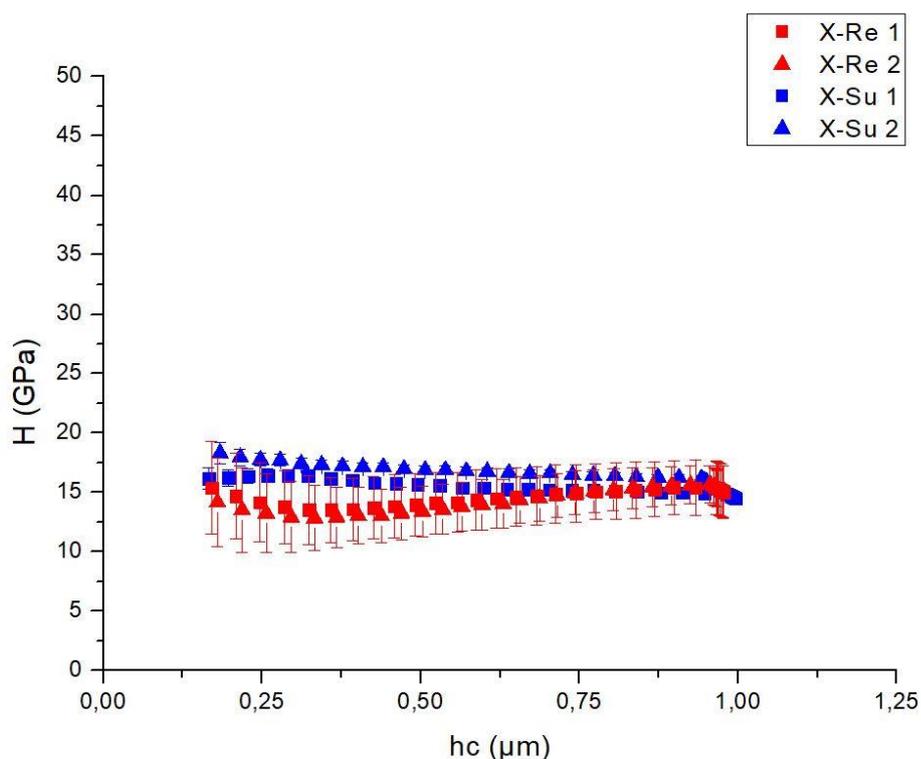
produto, e isto pode ser evidenciado na análise microestrutural e da condução do calor.

Na tentativa de sugestão a respeito da condução de calor no revestimento da amostra Y, é apresentada uma análise de dureza das duas amostras compostas.

### 4.3 ENSAIO DE DUREZA

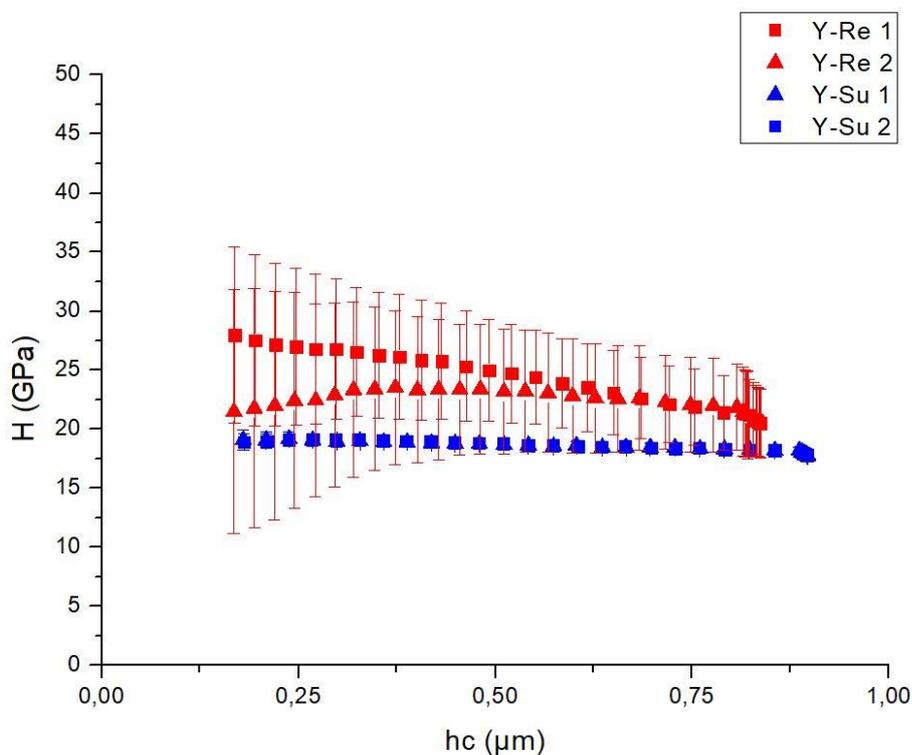
As Figuras 16 e 17 apresentam ensaios de nanoindentação das amostras X e Y para caracterização da propriedade mecânica de dureza, em que X-Re e Y-Re; e X-Su e Y-Su referem-se ao revestimento e ao substrato das amostras X e Y, respectivamente.

**Figura 16 - Ensaio de nanoindentação amostra X. X-Re e X-Su são referentes ao revestimento e ao substrato da amostra X, respectivamente, repetidas duas vezes o ensaio.**



Fonte: Autor, 2018.

**Figura 17 – Ensaio de nanoindentação amostra Y. Y-Re e Y-Su são referentes ao revestimento e ao substrato da amostra Y, respectivamente, repetidas duas vezes o ensaio.**



Fonte: Autor, 2018.

Avaliando as Figuras 16 e 17 é possível concluir que o substrato da amostra Y tem valor ligeiramente maior de dureza ( $H_y \approx 19$  GPa) quando comparado ao da amostra X ( $H_x \approx 17$  GPa). Por outro lado, o revestimento da amostra Y é cerca de duas vezes mais duro e rígido que a amostra X.

Materiais mais duros tendem a terem grãos com tamanhos menores em relação a materiais de baixa dureza. Tal característica está atrelada à facilidade do movimento de discordâncias dentro do material quando este é excitado por uma força externa.

Frandsen e Williams (1991) relacionam o tamanho de grão à condutividade elétrica do material. A maior quantidade de grãos em um material está atrelada a uma maior área para dispersão dos elétrons, diminuindo a mobilidade dos mesmos, resultando em uma maior condutividade elétrica.

A lei de Wiedemann Franz, relaciona a condutividade elétrica como sendo diretamente proporcional à condutividade térmica do material, sendo esta lei regida pela Equação 9:

$$2,4 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2} = \frac{ke}{\sigma T} \quad (9)$$

em que  $k$  = condutividade térmica,  $\sigma$  = condutividade elétrica e  $T$  = temperatura.

Como observado na Equação 1, a difusividade térmica é proporcional à condutividade térmica, e então pode-se associar a maior difusividade térmica do substrato da amostra Y (Tabela 4) a sua maior dureza, tendo em vista a organização dos grãos e a forma com que o calor é difundido em seu interior. Na Figura 9 observa-se que a amostra Y tem uma microestrutura mais refinada. Com relação ao revestimento pode-se sugerir que a difusividade térmica da amostra Y, devido a sua dureza, seja muito maior do que da amostra X. Esta sugestão concorda com os resultados da OPC e explicaria uma vez mais, o fato da não obtenção da difusividade térmica para duas camadas. Provavelmente o revestimento apresenta uma alta difusividade térmica, e um comportamento termicamente fino no range de frequência de modulação estudado e apenas possibilitou a propagação de calor através dele, determinando assim a difusividade térmica do substrato.

De um modo geral, os resultados obtidos estão em acordo com os resultados e análises feitas por Souza et al. onde os autores concluem que o substrato da amostra Y tem uma malha cristalina mais organizada e homogênea que a amostra X, bem como uma maior presença do elemento cobalto e por estes motivos apresenta uma difusividade térmica ligeiramente maior. De tal modo, neste trabalho sugere-se que a organização microestrutural (Figura 12) e a presença de cobalto (Figura 13) revelaram uma dureza cerca de 10% maior para o substrato da amostra Y em relação ao substrato da amostra X. Nos revestimentos, a amostra Y apresenta uma espessura 55% menor e uma dureza 60% maior. Sendo assim, é possível sugerir que da mesma maneira que o substrato, o revestimento da amostra Y também apresenta uma melhor organização cristalina em uma camada de revestimento menor. Tal característica sugere que suas propriedades termo físicas também sejam otimizadas.

Como citado por Puls, Klocke e Vaselovac (2016), melhores propriedades termo físicas em revestimentos de ferramentas de corte, sugerem uma melhor dissipação do calor que é destinado a ferramenta através do meio em que ela está inserida. Neste sentido, a amostra Y mostra ser ligeiramente vantajosa em relação a amostra X.

Esta sugestão poderá ser melhor avaliada após um estudo relacionando os diferentes parâmetros de usinagem dos materiais ao tempo de vida útil das ferramentas.

## 5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho possibilitou um estudo da difusividade térmica do revestimento de amostras de ferramentas de corte revestidas de fabricantes diferentes.

Foi encontrado o valor de  $(0,62 \pm 0,08)$  cm<sup>2</sup>/s para a difusividade térmica do revestimento da amostra X. Entretanto a determinação deste dado para a amostra Y não foi possível devido a pequena espessura da camada de seu revestimento.

Técnicas complementares como o EDS e o ensaio de nanoidentificação foram utilizadas para relacionar os dados encontrados, sugerindo que a amostra Y possui um revestimento com difusividade térmica maior que o encontrado na amostra X, devido a sua dureza e composição química.

Os resultados aqui obtidos são importantes, pois mostram que a eliminação do calor da ferramenta está atrelada diretamente a sua superfície revestida. Sendo assim, propriedades termofísicas otimizadas, melhoram as condições de trabalho, sugerindo através dos dados obtidos neste trabalho, que a utilização da amostra Y em processos de usinagem é vantajosa.

Fica como sugestão para trabalhos futuros os seguintes tópicos:

- Análise de desgaste em ferramentas com propriedades térmicas diferentes;
- Análise de desgaste em ferramentas de composição e espessura de revestimento diferentes;
- Determinação da difusividade térmica de cada elemento que compõe o revestimento;
- Modelar o escoamento do ar ao redor do conjunto ferramenta de corte, calço e porta-ferramentas possibilitando o estudo do efeito da convecção;
- Simular camadas de revestimentos com composições diferentes;
- Análise e relação da dureza com a difusividade térmica.
- Determinação da difusividade térmica para o revestimento da amostra Y pela técnica de dois feixes, ou por ajuste do sinal fotoacústico por modelo de duas camadas.

## REFERÊNCIAS

ALVES, S. M.; OLIVEIRA, J. F. G. **Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental.** São Paulo, 2007.

ASTRATH, F. B. G. **Excitação óptica tipo degrau nas técnicas fototérmicas: estudo de vidros ópticos e de materiais para produção de energia.** Tese de doutorado apresentada à Universidade Estadual de Maringá para a obtenção do título de doutor em Física. (2011).

CASTRO, P. R. A. Dissertação de Mestrado. **Aspectos tecnológicos da usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal.** UFSC. Florianópolis, julho de 2001.

COSTA, E. S.; SANTOS, D. J. **Processos de Usinagem.** Divinópolis, 2006.

COSTA, E. S., *et al.* **Qualidade dos furos usinados com diferentes métodos de lubrificação e refrigeração.** Revista Máquinas e Metais, São Paulo, nº 484, p. 140-161, maio 2006.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 6ª edição São Paulo: Artiliber Editora, 2008. 262p

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, vol. 1, São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1970. 754p.

FERRARESI, D. - **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** Ed. Edgard Blücher. São Paulo. 10ª reimpressão. 2000. 751 p.

FRANSEN, M. V. & WILLIAMS, W. S., **Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of Cemented Transition-Metal Carbides at Low Temperatures.** Journal of the American Ceramic Society 74 (1991): 1411-1416.

GOMES, F. M. P. et al. **Uma solução analítico-numérica para a difusividade do calor em um cilindro com e sem geração de calor.** CILAMCE 2016 Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering Suzana Moreira Ávila (Editor), ABMEC, Brasília, DF, Brazil, November 6-9, 2016

GRZESIK, W.; BARTOSZUK, M.; NIESLONY, P. 2004, **“Finite Difference Analysis of the Thermal Behavior of Coated Tool in Orthogonal Cutting of Steels”**, **International Journal of Machining Tools and Manufacture**, Vol. 44, pp. 1451 – 1462.

KHAJEHZADEH, M.; AKHLAGHI, M.; RAZFAR, M. R. **“Finite Element Simulation and Experimental Investigation of Tool Temperature During Ultrasonically Assisted Turning of Aerospace Aluminum Using Multicoated Carbide Inserts”**, International Journal of Advanced Manufacturing Tehcnology, 2014, Vol. 75, pp. 1163-1175.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; Coelho, R. T.; SILVA, M. B. **“Teoria das Usinagens dos Materiais”**, Editora Blucher, 1ª ed, São Paulo, Brasil, 2009, 191 p.

MACHADO, F. A. L; **Caracterização térmica da Liga de Metal Duro WC-10%pCo utilizando Técnicas Fototérmicas**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense – Campos dos Goytacazes – RJ, 2007.

MANSANARES, A. M, et al. **“Photoacoustic measurement of the thermal properties of two-layer system”**; Physical Review B, 42(7), 4477-4486 (1990).

MERCADIER, M.E; HEBD, C. R. **Services Acad. Sci.** 92, 409. Paris, 1881.

MODERN METAL CUTTING: **A practical handbook**. SANDVIK Coromant, 1996.

MONARO, R. L. G; HELLENO, A. L. **Desenvolvimento de um índice de desempenho dinâmico (iddyn) para avaliação da estratégia de usinagem em máquinas-ferramentas**. Campina Grande, PB: CONEM, 2010.

NAIME, J. de M.; *et al.* **Conceitos e aplicações da instrumentação para o avanço da agricultura**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 412p.

OLIVEIRA, D. B. C. de. et al. **Estimativas da Difusividade Térmica e do Fluxo de Calor de um Solo no Agreste Pernambucano**. Revista Brasileira de Geografia Física vol.08, n.04 (2015) 1053-1067.

PAIVA, R. **X Encontro Latino de I.C e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação**. Universidade de Vale da Paraíba.

PREECE, W. H. **Proceedings of the royal society of London**. London, 31, 506, 1881.

PULS, H.; KLOCKE, F; VESELOVAC, D, 2016. **FEM-Based Prediction of Heat Partition in Dry Metal Cutting of AISI 1045**. International Journal of Advanced Manufacturing Tehcnology, Vol. 86, pp. 737-745.

RODRIGUES, I. C. et al. **Estudo das propriedades térmicas e lubrificantes de sistemas alternativos no processo de torneamento**. 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação Joinville, SC - 2017.

ROSENCWAIG, A. **Photoacoustics and Photoacoustic Spectroscopy**. Wiley, 1980.

ROSENCWAIG A.; GERSHO A. **Theory of the Photoacoustic Effect with Solids**, J. Appl. Phys, v.47, p.64, 1976.

SILVA, E. N. D. **Tese de doutorado apresentada ao Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá – PR, (2005);**

SILVA, M. D.; BANDEIRA, I. N.; MIRANDA, L. C. M. **Open-cell photoacoustic radiation detector.** J. Phys. E: Sci. Instrum., 20 (1987) 1476.

SOUZA, J. S. **Caracterização Termo-Óptica de Ferramentas de Metal Duro Via Técnicas Fotoacústicas.** Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa. (2016)

SOUZA, J. S. et al. **Thermal characterization of hardmetal by open photoacoustic cell technique.** Ponta Grossa, PR – 2017.

SUBRAMANIAN, C. *et al.* **Performance evaluation of tin-coated twist drills using force measurement and microscopy.** Surface and Coatings Technology, v. 62 p. 641-648, 1993.

ZEILMANN R. P., **Tendência aponta para a usinagem a seco.** Noticiário de Equipamentos Industriais. 2007.