

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**JULIANA SOARES DE SOUZA**

**CARACTERIZAÇÃO TERMO-ÓPTICA DE FERRAMENTAS DE  
METAL DURO VIA TÉCNICAS FOTOACÚSTICAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2016**

**JULIANA SOARES DE SOUZA**

**CARACTERIZAÇÃO TERMO-ÓPTICA DE FERRAMENTAS DE  
METAL DURO VIA TÉCNICAS FOTOACÚSTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Profa. Dra. Daniele T. Dias Ferreira Rosa

Co-orientador: Prof. Dr. Aldo Braghini Junior

**PONTA GROSSA**

**2016**



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**

**CARACTERIZAÇÃO TERMO-ÓPTICA DE FERRAMENTAS DE METAL DURO VIA  
TÉCNICAS FOTOACÚSTICAS**

por

**JULIANA SOARES DE SOUZA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 6 de junho de 2016 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.

**Profa. Dra. Daniele Toniolo Dias Ferreira Rosa**  
Orientadora

**Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz**  
Membro Titular

**Prof. Dr. Romeu Szmoski**  
Membro Titular

**Prof. Me. Marcos Eduardo Soares**  
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Laercio Javarez Junior**  
Coordenador do Curso

*Dedico este trabalho a Deus,  
pelo amor, sustento e graça à mim concedida.*

*Aos meu pais e minha irmã  
que em todo tempo se mantiveram em oração  
e com amor sempre me encorajaram.*

*E, aos amigos  
que se tornaram família durante todo esse período.*

## **AGRADECIMENTOS**

Acredito que nessa jornada chamada vida caminhamos com parcerias. Na alegria ou na tristeza, nas vitórias ou derrotas encontramos pessoas enviadas por Deus prontas a partilhar, sem nada em troca, cada página da nossa história. Por isso, dedico essa página àqueles que nessa etapa dedicaram seu tempo a mim, em prol dessa conquista.

Agradeço a minha orientadora, Profa. Dra Daniele T. Dias, por ter confiado em mim, desde o primeiro momento, quando me escolheu para trabalhar com ela durante o estágio no DAFIS, da UTFPR-Ponta Grossa, e em seguida na iniciação científica. Sou grata a ela pelo suporte, dedicação, compreensão e carinho durante o trabalho de conclusão de curso. Ao seu aluno de iniciação Tialin Barboza, que intermediou e auxiliou questões durante o trabalho.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Aldo Braghini, pela compreensão e pelas conversas esclarecedoras, por ter disponibilizado seu tempo a fim de oferecer apoio técnico. Além, de ter cedido as amostras para que o trabalho pudesse ser desenvolvido.

Ao Prof. Dr. Francisco Serbena e ao C-Labmu (Complexo de Laboratórios Multiusuários) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) pelas portas sempre abertas, sempre pronto a ajudar, de forma atenciosa, e principalmente pelo suporte para que ensaios pudessem ser realizados.

Ao Prof. Dr. Anderson G. M. Pukasiewicz e ao Eriel Sabino, por terem disponibilizado seu tempo, laboratório, equipamentos, auxiliando quanto ao manuseio e preparação das amostras de insertos de metal duro.

Ao Dr. Milton D. Michel do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Departamento de Engenharia de Materiais, da UEPG pelo auxílio, esforço, atenção e comprometimento para que se tornasse possível a aquisição das imagens no MEV.

Ao meu pai, que em todo tempo lutou para que meus sonhos pudessem ser realizados. A minha mãe que me fez forte nos momentos de fraquezas. A minha irmã pela amizade que transcende os laços de sangue.

A Deus, a gratidão por tantas pessoas que se tornaram bênçãos na minha vida.

E a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo auxílio financeiro.

## RESUMO

SOUZA, Juliana. **Caracterização Termo-óptica de Ferramentas de Metal Duro Via Técnicas Fotoacústicas**. 2016. 51f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

Devido à grande competitividade e a exigência de uma usinagem mais sustentável com mínimo impacto ambiental, cada vez mais se tem buscado reduzir ou eliminar a utilização de fluidos de corte. Este processo é denominado de usinagem a seco. No entanto, o inconveniente desse processo é que a parte do calor gerado durante a remoção do material, o qual seria dissipado se houvesse a presença do fluido de corte, contribui diretamente para o crescimento do desgaste de ferramentas de corte. Focado nisso, o presente trabalho teve o objetivo de se analisar a capacidade de difusão térmica de dois insertos (de fabricantes diferentes). Os insertos são de Metal Duro, ambos destinados ao processo de fresamento de aços. Para isso, foi avaliada a propriedade térmica de difusividade térmica de cada inserto, por meio da técnica de célula fotoacústica aberta e a microestrutura por difratometria de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Para a amostra de Fabricante X o valor da difusividade térmica foi de  $0,194 \pm 0,007 \text{ cm}^2/\text{s}$  e o Fabricante Y de  $0,263 \pm 0,009 \text{ cm}^2/\text{s}$ . No entanto, o que se observou através de difratogramas é que mesmo de fabricantes e difusividades térmicas diferentes as amostras possuem similaridade em seus componentes químicos. Por outro lado, a amostra de Fabricante Y apresentou uma microestrutura mais refinada e com menor crescimento dos grãos quando comparado ao Fabricante X.

**Palavras chave:** ferramenta de corte, difusividade térmica, OPC, microestrutura

## ABSTRACT

SOUZA, Juliana. **Characterization Term-optic Carbide Tools Via Technical Photoacoustic**. 2016. 51p. Monograph (Mechanical Engineering) - Graduate Program in Mechanical Engineering, Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa, 2016.

Due to high competitiveness and the demand for a more sustainable machining with minimal environmental impact, the searches for reduction or elimination of cutting fluids usage has increased. This process called dry machining. However, the disadvantage of this process is of the heat generated during the material removal, which would be dispelled if there were the presence of the cut fluid, directly affecting the wear of cutting tools. Focused on that, the aim was the thermal diffusivity analysis of the two inserts (from different manufacturers). The inserts are of Carbide tool, both for the milling of steel. For this, it was evaluated the thermal property of diffusivity of each insert, by open photoacoustic cell technique and microstructure by X-rays diffraction and scanning electron microscopy. For the manufacturer of the sample X the value of the thermal diffusivity was  $0.194 \pm 0.007 \text{ cm}^2/\text{s}$  and manufacturer Y  $0.263 \pm 0.009 \text{ cm}^2/\text{s}$ . However, what it was observed by XRD patterns is that different manufacturers and even samples with different thermal diffusivities show similarities in their chemical components. On the other hand, the Y manufacturer sample had a finer microstructure, and little growth of WC-Co grains when compared to X.

**Keywords:** cutting tool, thermal diffusivity, OPC, microstructure

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Fresamento tangencial: (a) concordante e (b) discordante .....	7
Figura 2 Fresa de Dentes Postiços .....	8
Figura 3 Diagrama esquemático de composição do Metal Duro .....	10
Figura 4 Técnicas de revestimentos de insertos de Metal Duro: (a) CVD e (b) PVD .....	11
Figura 5 Geração de calor e distribuição de temperaturas nas regiões circundante do cavaco, da ferramenta de corte e da peça de trabalho .....	12
<b>Figura 6 Modelo RG</b> .....	14
Figura 7 OPC: Desenho Esquemático do Microfone de Eletreto.....	19
Figura 8 Esquema experimental para a OPC utilizado no LAPTO da UTFPR – Ponta Grossa.....	20
Figura 9 Amplitude do sinal PA normalizado em função da frequência de modulação para os insertos: (a) X e (b) Y. ....	25
Figura 10 Ajuste linear de $S/\chi^*f$ em função de $f^{1/2}$ , para os insertos: (a) Fabricante X e (b) Fabricante Y.....	26
Figura 11 Difratoograma de raios-x para os insertos: (a) X e (b) Y .....	30
Figura 12 Microscopia Eletrônica e Varredura, 25kV, x5000, SBSE das amostras de: (a) Fabricante X e (b) Fabricante Y .....	31
Figura 13 EDS das amostras de: (a) Fabricante X e (b) Fabricante Y .....	32
Fotografia 1 Amostras seccionadas dos insertos: (a) Fabricante X e (b) Fabricante Y .....	22
Fotografia 2 mostras embutidas e tratadas para análise no MEV-EDS .....	23



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Propriedades térmicas e físicas de alguns materiais.....	16
Tabela 2 Resultados da Difusividade Térmica dos Insertos X e Y .....	27
Tabela 3 Valores de difusividade térmica encontrados na literatura para amostras sinterizadas .....	28
Tabela 4 Composição química dos Insertos X e Y .....	32

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	2
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	2
<b>2 EMBASAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
2.1 USINAGEM A SECO .....	4
2.2 FRESAMENTO .....	6
2.3 FERRAMENTA DE CORTE .....	7
2.4 METAL DURO .....	9
2.5 TEMPERATURA DE CORTE .....	12
2.6 TÉCNICAS FOTOACÚSTICAS .....	13
2.7 CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS COM BASE EM PRÂMETROS ÓPTICOS E TÉRMICOS .....	16
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>18</b>
3.1 MÉTODO DE CÉLULA FOTOACÚSTICA ABERTA - OPC .....	18
3.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	21
3.3 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV-EDS).....	21
3.4 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS .....	22
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>24</b>
4.1 DIFUSIVIDADE TÉRMICA.....	24
4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX) .....	29
4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – ESPECTRÔMETRO DE RAIOS X POR DISPERSÃO DE ENERGIA (MEV-EDS) .....	31
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>34</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>35</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos mais antigos de transformação da matéria-prima em produto acabado. Contudo, se tem buscado a modernização do processo a fim de atender um mercado cada vez mais competitivo economicamente e preocupado com questões ambientais. 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 se obter uma usinagem mais limpa.

Com o decorrer do tempo de uso o fluido de corte sofre degradação. Um dos fatores que afetam a vida do fluido de corte (principalmente as emulsões) 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 custo elevado para a empresa e de riscos significativos ao meio ambiente<sup>1</sup>.

Devido a esses aspectos de ordem ambiental e econômica estudos têm sido realizados para a aplicação de usinagem sem fluido de corte, conhecida como usinagem a seco.<sup>2,3,4</sup> A usinagem a seco significa que o processo de usinagem será executado com ausência total de refrigeração e lubrificação proporcionada pelos fluidos de corte. O que garante relevante redução nos custos, pois o descarte de fluidos de corte é sujeito a rigorosas regulamentações. Um tratamento e uma disposição final inadequada acarreta problemas ambientais, além de gerar elevado custo às empresas.<sup>5,6</sup>

No entanto, há grande dificuldade em se empregar a usinagem a seco devido à elevada temperatura, superior a temperatura alcançada com o uso do fluido de corte, durante o processo de usinagem, o que acarreta num severo desgaste na superfície do inserto.<sup>7</sup> 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 condutividade térmica, capaz de manter um gradiente de temperatura estável em seu interior.<sup>8</sup>

Portanto, para que a usinagem a seco se torne mais usual é preciso compreender fatores que influenciam a geração, o fluxo e a distribuição do calor na ferramenta, como também o material da peça próximo a aresta de corte da ferramenta de corte<sup>9</sup>.

Dentro deste contexto, o presente trabalho visa analisar o parâmetro térmico de difusividade térmica, via Técnica de Célula Fotoacústica Aberta (OPC), e a microestrutura de duas amostras de ferramentas de corte para o fresamento. De forma a estimar o modo que o calor gerado no trabalho de corte, por meio do processo de fresamento, se difunde em insertos de metal duro. Este estudo traz uma contribuição importante, pois até o presente momento, salvo melhor juízo, não foi encontrado estudos da difusividade térmica, via Técnica de Célula Fotoacústica Aberta, de insertos comerciais de metal duro.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar a difusividade térmica de ferramentas de corte de metal duro usando a Técnica de Célula Fotoacústica Aberta (OPC) de dois insertos de fabricantes diferentes, ambos destinados à operação de fresamento de aços.

## 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Obter amostras seccionando os insertos de Metal Duro de dois fabricantes distintos.
- Utilizar a Técnica de Célula Fotoacústica Aberta para determinar a difusividade térmica de cada fabricante.
- Tratar os resultados matematicamente, com o auxílio de um programa gráfico.
- Avaliar qualitativamente as fases encontradas nos dois insertos através da Difração de raios X.
- Fazer embutimento das amostras dos insertos em baquelite, zircônica e cobre, acrescentar fita condutora e deposição de ouro para realização das imagens no MEV.

- Obter imagens da microestrutura e avaliar a composição dos dois insertos através da Microscopia Eletrônica de Varredura – Espectrômetro de raios X por Dispersão de Energia (MEV-EDS).

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo é realizado uma breve explicação teórica dos assuntos envolvidos no contexto da produção científica. Foi feito um resumo da literatura a respeito do processo de usinagem a seco, do fresamento, da ferramenta de corte, do Metal Duro (material dos insertos), da temperatura de corte gerada na usinagem e da técnica fotoacústica, sendo este último tema, o principal meio de desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso.

### 2.1 USINAGEM A SECO

De forma geral entende-se por usinagem toda operação que consiste na remoção de material capaz de proporcionar à peça uma forma, dimensões, acabamento e/ou a combinação das três, com geração de cavaco. Sua principal característica é a produção de cavaco, ou seja, uma porção de material retirada da peça pela ferramenta de corte durante o período de confecção.<sup>10</sup>

Reconhecida como um dos maiores processos de manufatura e de grande importância na competitividade de uma empresa<sup>11</sup> é considerada mundialmente como o método mais usual de fabricação e responsável por transformar em cavaco quase 10% de todo o metal produzido no planeta<sup>12</sup>. Ainda assim, ela está em contínuo desenvolvimento. O principal intuito é melhorar a produtividade e a eficiência, sendo esses os grandes desafios da indústria de usinagem<sup>13</sup>.

Outro estímulo para o avanço dos processos de fabricação é o fator ambiental. Atualmente a questão ambiental é tema prioritário em empresas socialmente responsáveis, já que uma produção mais limpa minimiza a geração de resíduos<sup>14</sup>. Neste sentido, a técnica de se utilizar os recursos de forma eficiente, reduzindo os impactos gerados sobre o meio ambiente e o homem, se torna uma forma de aumentar a competitividade, eficiência e lucratividade das empresas de modo sustentável. Diversas normas de gestão ambiental foram criadas, a ISO 14001 é a mais universalizada e busca orientar empresas com a preocupação em desenvolver e fabricar produtos respeitando os recursos naturais, o meio ambiente, e a saúde do ser humano.

Em virtude da busca por uma produção mais limpa, as vantagens quanto aos benefícios do fluido de corte têm sido considerado de menor relevância, mediante aos impactos negativos em relação à aspectos ambientais.<sup>15,16</sup> Como resultado das sérias preocupações acerca dos problemas ecológicos e econômicos, pesquisas têm sido realizadas nas últimas décadas para reduzir ou mesmo eliminar a utilização de fluidos de corte.<sup>17, 18</sup>

Com o propósito de atenuar os impactos econômicos e ambientais presentes no método de lubrificação convencional, outras técnicas foram desenvolvidas, como o resfriamento criogênico, arrefecimento nano-fluidos, lubrificantes sólidos, mínima quantidade de lubrificação, refrigeração de alta pressão, o NDM (Near Dry Machining) e a usinagem a seco. Com grande potencial, tais técnicas têm mostrado ótimos resultados em relação à técnica convencional de refrigeração e lubrificação<sup>19</sup>.

A usinagem a seco é julgada como a operação de corte menos nociva ao meio ambiente, à saúde do homem e eficaz na redução do consumo de energia. As vantagens de usinagem a seco são:<sup>20</sup>

- A não-poluição da atmosfera ou da água, o que reduz o perigo à saúde, tais como danos a pele e problemas respiratório,
- Ausência de resíduo de lubrificante nas peças usinadas, podendo até eliminar os custos de limpeza e consumo de energia associada à essa etapa,
- Nenhum resíduo de lubrificante em cavacos, o que diminui os custos com o descarte e consumo de energia.

A principal característica da usinagem a seco é a ausência total de fluidos de corte em todo o processo de confecção da peça. Todavia, a sua implementação não pode se resumir no desligamento do fornecimento do fluido de corte. O fluido de corte desempenha as funções básicas de refrigerar e lubrificar, reduz o atrito e, portanto, a geração de calor, agindo como dissipador; são responsáveis por diversas funções secundárias, como no transporte de cavacos, além de atuar na limpeza das peças de trabalho, ferramentas e acessórios.

Portanto, o processo de fabricação com omissão total de fluido de corte é bastante delicado pois, devido a essa particularidade são geradas elevadas temperaturas de corte, o que não é adequado para diversos tipos de materiais, fazendo com que a vida útil da ferramenta seja reduzida e produza uma má qualidade da superfície usinada.

Sendo assim, analisar, compreender os mecanismos do processo de corte e o modo com que o calor é difundido nas ferramentas de corte é uma questão-chave no desenvolvimento de um processo de usinagem a seco econômico e seguro.

## 2.2 FRESAMENTO

A operação de fresamento é o processo de usinagem em que a retirada de material, na forma de cavaco, é efetuada por uma ferramenta provida de arestas cortantes organizadas em torno de um eixo de forma simétrica, a qual é chamada fresa.<sup>21</sup>

No processo de fresamento a máquina operatriz utilizada é denominada fresadora. Sua principal função é assegurar os movimentos necessários da peça e da ferramenta de corte, o que é essencial para realização do corte.<sup>22</sup> Uma vez que é a mesa da máquina responsável pelo avanço da peça de trabalho em direção à fresa em rotação, o que promove a remoção de material durante a usinagem.<sup>21,23</sup>

O cavaco tem espessura de corte variável. A combinação do movimento de avanço da mesa com a rotação da ferramenta multicortante de geometria definida reproduz um corte interrompido<sup>21</sup>, isto é, o inserto passa por ciclos ativos e inativos. Ativo quando entra na peça e efetua o corte. Inativo, após a saída do inserto da peça, onde não faz a retirada do material

De forma geral, o fresamento é dividido em dois tipos básicos: o tangencial e o frontal. A fresagem frontal é indicada para obtenção de superfícies planas e perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta. Enquanto a fresagem tangencial na obtenção de superfície plana e paralela ao eixo de rotação da ferramenta. Subdivida em fresamento concordante (o sentido de movimento de avanço igual ao da rotação da fresa) e discordante (o sentido do movimento de avanço contrário ao da rotação da fresa).

No movimento concordante, figura 1 (a), a espessura do cavaco ao longo da retirada do material vai se reduzindo gradualmente até zero no final do corte. As vantagens são um melhor acabamento superficial, uma baixa vibração no processo de usinagem, quando comparado ao movimento discordante, menor força e potência de avanço e menor desgaste da ferramenta. Por outro lado, há a desvantagem devido à folga gerada pelo desgaste do sistema fuso e porca, responsáveis pelo avanço da



mesa. A força de corte pode puxar a mesa e acarretar um corte de espessura maior do que o programado.

No movimento discordante, figura 1 (b), a espessura do cavaco se inicia igual a zero e ao longo da retirada do material vai aumentando gradualmente. Embora, nesse movimento o desgaste da ferramenta seja maior, ele é recomendado em casos em que há folga entre o sistema fuso e porca, pois, a força de corte é oposta à força de avanço da mesa.

Em geral as vantagens do fresamento são inerentes à versatilidade da operação:<sup>21</sup> capaz de gerar geometrias com considerável grau de complexidade, resultado da grande variedade de formas e tipos de fresas, permite a realização de diversos tipos de operação garantindo habilidade para elaboração de superfícies planas, curvas, ressaltos, ranhuras, roscas, engrenagens etc. Permite significativa qualidade de acabamentos superficiais, altas taxas de remoção de material e alta produtividade.<sup>22, 24,25</sup>

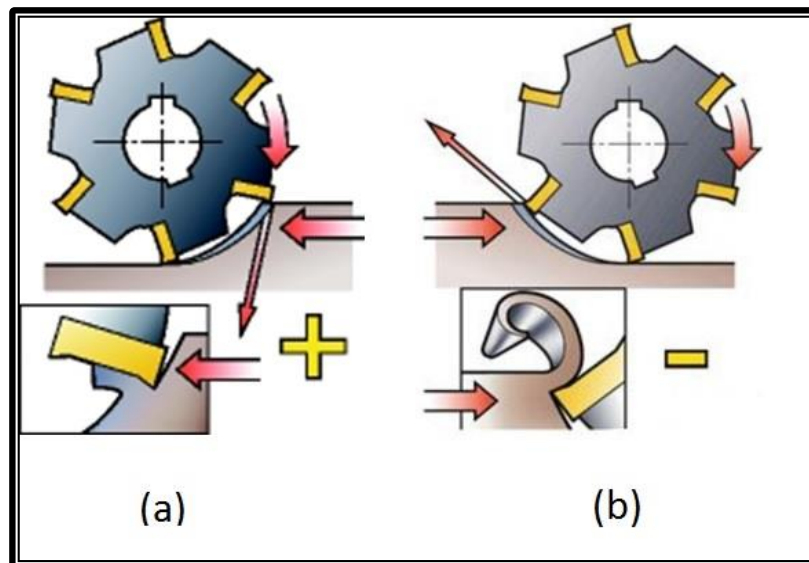


Figura 1 Fresamento tangencial: (a) concordante e (b) discordante  
Fonte: Sandvik Coromant (2010)

### 2.3 FERRAMENTA DE CORTE

As ferramentas de corte exercem um importante papel na usinagem convencional, são cuidadosamente projetadas e ainda são motivo de pesquisas. Em contínua evolução, as ferramentas têm sido cada vez mais otimizadas para atender à

variadas operações. Como já descrito, na operação de fresamento a ferramenta de corte é denominada fresa, foco do presente trabalho em virtude das amostras avaliadas serem insertos para fresamento.

Podem ser construídas a partir de um material adequado para ferramenta (aço carbono de alto teor de carbono ou aços especiais com elementos de liga em elevados teores, como os aços rápidos), ou ter somente o corpo formado por um aço de custo inferior onde na extremidade são montados os dentes, com possibilidade de fixação por solda ou fixação mecânica. Tal tipo de fresa é conhecida como, fresa com dentes postiços figura 2. Em que pequenas placas chamadas de inserto compostas de um material especial, de elevada dureza (carboneto de tungstênio sinterizado aglomerado com cobalto ou material cerâmico do tipo óxido de alumínio), formam arestas de corte, iguais, dispostas de forma simétrica em relação ao eixo de rotação e na mesma distância entre si.<sup>22, 26</sup>



**Figura 2 Fresa de Dentes Postiços**  
**Fonte: Sandvik Coromant (2010).**

A compreensão acerca da grande variedade de tipos de ferramentas de corte, como também, as suas características e a necessidade de uma seleção ideal, são fatores relevantes a serem considerados no planejamento da produção por usinagem. Essas considerações têm influência direta no sucesso do desempenho das ferramentas nas operações de corte<sup>27</sup>. Pois, durante a fresamento avarias podem acontecer na ferramenta, como: quebras, trincas sulcos em forma de pente (originada

pelo somatório das trincas de origem térmica com as de origem mecânica)<sup>21</sup> e deformações plásticas.

Em se tratando da usinagem a seco a exigência quanto a empregabilidade das ferramentas, são ainda maiores. Pois, na ausência do fluido refrigerante o atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho é elevado e, portanto, ocasiona o aumento exagerado da temperatura de corte. Conseqüentemente o desgaste da ferramenta é intensificado, havendo assim a diminuição da vida útil da ferramenta <sup>28-29</sup>. Com o aquecimento, aumenta-se o desgaste por abrasão e por adesão da ferramenta, além disso, os cavacos ficam com maior dificuldade para adquirir uma forma definida, podendo soldar-se à ferramenta.<sup>30</sup>

Com o intuito de minimizar as dificuldades presente na usinagem a seco, materiais têm sido pesquisados para compor ferramentas de corte que sejam capazes de conter a geração de calor ou se manter estruturalmente mediante ao calor. Para isso, os materiais da ferramenta, a geometria da ferramenta, as condições de corte, a composição do material da peça e a aplicação de ferramentas revestidas tem sido alvo de aprimoramento<sup>31-32</sup>.

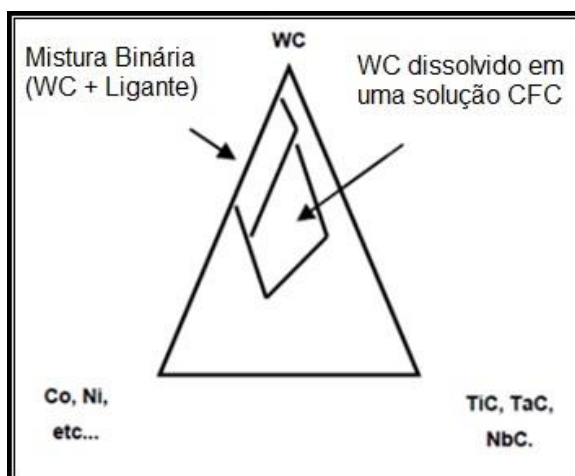
## 2.4 METAL DURO

O metal duro é um dos materiais mais importantes utilizados na fabricação de ferramentas de corte.<sup>33</sup> A escolha do material de uma ferramenta de corte é de grande importância, seu sucesso depende de fatores como: material da peça de trabalho, operação de usinagem, condição da máquina operatriz, forma e dimensões da ferramenta, custo, uso ou não do fluido de corte.

O metal duro é um material resultante da metalurgia do pó, processo capaz de oferecer controle rigoroso da composição da liga e do tamanho dos grãos do carboneto.<sup>34,35</sup> Basicamente fabricado a partir da obtenção dos pós metálicos, mistura dos pós, compressão em pastilhas, sinterização e o controle físico final do material sinterizado.<sup>33</sup>

Sua composição compreende em partículas de carboneto de tungstênio (WC), extremamente duro e de alta resistência mecânica, associado a um ligante extremante rico em cobalto metálico (Co), além, de poder conter outros elementos adicionais como carbonitreto. Descritos basicamente por um diagrama ternário mostrado na

figura 2, onde uma proporção elevada é composta por uma mistura binária de WC mais um ligante (comumente WC-Co). Outras classes contêm considerável quantidade de TiC (carboneto de titânio), TaC (carboneto de tântalo), NbC (carboneto de nióbio), e em menor parte outros carbetos. Estes compostos dissolvem níveis significativos do WC em uma solução contínua CFC (Cúbica de Face Centrada) .<sup>36</sup>



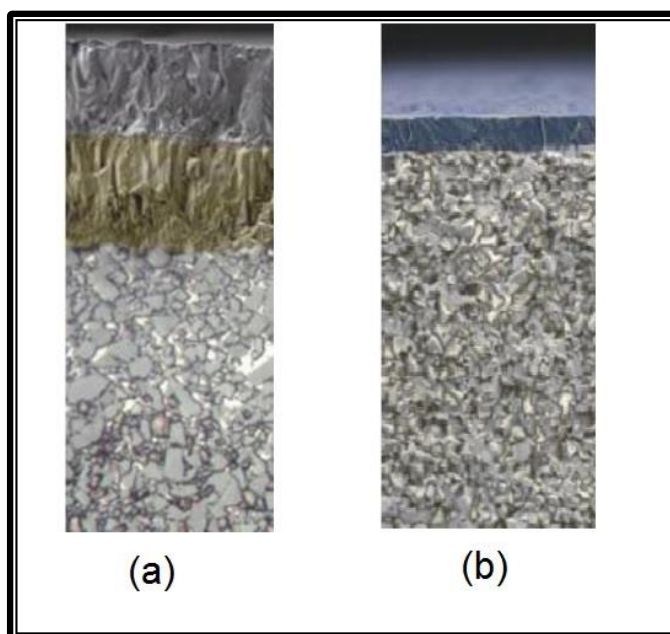
**Figura 3 Diagrama esquemático de composição do Metal Duro**  
**Fonte: Rodrigues (2006).**

O Metal Duro é largamente aplicado na fabricação de ferramentas de corte, graças a sua alta propriedade mecânica.<sup>37</sup> Caracterizado pela combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste abrasivo e tenacidade.<sup>33</sup> A vantagem do uso do metal duro em relação ao aço, por exemplo, reside no aumento considerável do tempo de vida destas ferramentas<sup>38</sup>.

Outro fator a contribuir no desempenho das ferramentas de corte de metal duro é o revestimento. A maioria dos insertos de metal duro são revestidos e representam a maioria de todas ferramentas utilizadas para o corte de metais.<sup>27, 39</sup> O revestimento é classificado de acordo com o processo de deposição no substrato, pode ser por deposição química em fase de vapor e deposição física em fase de vapor, conforme a figura 4.

A deposição química em fase de vapor (Chemical Vapor Deposition - CVD) é originada por reações químicas entre 700°C e 1050°C, tem como característica alta resistência ao desgaste e excelente adesão ao metal duro (figura 4 (a)). Coberturas CVD combinam MT-Ti(C,N), carbonitreto de titânio, sua dureza oferece resistência ao desgaste por abrasão na redução de desgaste de flanco, o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de alumínio) quimicamente inerte com baixa condutividade térmica tornando o inserto resistente à

craterizações, atuando como barreira térmica melhorando a resistência a deformação plástica, e o TiN (nitreto de titânio) o qual melhora a resistência ao desgaste e é usada para detectar desgastes. A deposição física em fase de vapor (Physical Vapor Deposition - PVD) é processada em temperaturas baixas entre 400°C e 600°C, e proporciona ao metal duro resistência ao desgaste decorrente da sua dureza, tenacidade a aresta e resistência contra trincas térmicas (figura 4 (b)). Os principais constituintes da cobertura PVD são o TiN (nitreto de titânio) o qual possui propriedade de uso geral e uma cor dourada, o Ti(C,N) que é o carbonitreto de titânio de dureza mais elevada que o TiN, tem a finalidade agregar resistência ao desgaste de flanco e o Ti(C,N) que é o nitreto de titânio-alumínio de maior dureza em combinação com a resistência à oxidação, melhorando a resistência ao desgaste.



**Figura 4 Técnicas de revestimentos de insertos de Metal Duro: (a) CVD e (b) PVD**  
**Fonte: Sandvik Coromant (2010)**

Outros componentes podem ser agregados ao metal duro, em conjunto com o WC-Co, como os carbonetos de titânio (TiC) que aumenta a resistência à craterização, os de tântalo (TaC) e os de nióbio (NbC) que aumentam a tenacidade e melhoram muito a performance das ferramentas de metal duro quanto à prevenção de desgastes originados nos processos de formação de cavacos, particulares a cada tipo de material.<sup>10, 26</sup>

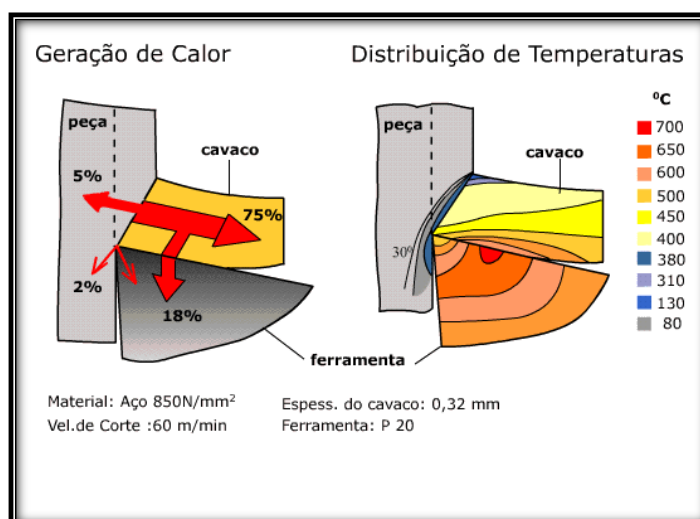
Ainda assim, novos compostos têm sido gerados com propriedades similares ou superiores ao metal duro tradicional,<sup>37</sup> fazendo a substituição parcial ou total do

cobalto tradicional por outros materiais de menor custo e menos tóxicos. Ligas de Fe-Ni e Fe-Cr-Ni têm sido investigadas e mostram resultados altamente promissores. Aluminetos de níquel ( $\text{Ni}_3\text{Al}$  e  $\text{NiAl}$ ) e aluminetos de ferro ( $\text{Fe}_3\text{Al}$  e  $\text{FeAl}$ ) também tem sido alternativa de materiais ligantes para compósitos de WC em aplicações de alta temperatura e ambientes extremamente corrosivos<sup>38, 39</sup>.

## 2.5 TEMPERATURA DE CORTE

A temperatura exerce forte influência sobre o processo de desgaste da ferramenta<sup>40</sup> uma vez que com o aumento de temperatura a ferramenta perde a dureza, desgasta-se rapidamente e perde sua utilidade. Este fator é ainda mais agravante em casos de usinagem a seco,<sup>41</sup> uma vez que é ausente de fluido de corte, o qual atua na redução da temperatura de trabalho.

Conforme exposto na figura 5 o calor é inerente ao processo de usinagem. Quase toda energia do trabalho de corte é convertida em calor, o que produz temperaturas elevadas nas regiões de deformação circundante do cavaco, da ferramenta e da peça de trabalho.<sup>42</sup> Sua geração é proveniente da deformação plástica da raiz do cavaco na região de cisalhamento, do atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta e ao atrito da peça com a superfície de incidência da ferramenta<sup>33</sup>.



**Figura 5** Geração de calor e distribuição de temperaturas nas regiões circundante do cavaco, da ferramenta de corte e da peça de trabalho  
**Fonte:** Souza (2011).

A geração de calor exagerada durante o corte é capaz de provocar mudanças nas características físicas e mecânica do metal de trabalho e da ferramenta de corte. E depende das propriedades do material da peça e da ferramenta, da geometria da ferramenta e dos parâmetros de corte.

Elevadas temperaturas reduzem o limite de escoamento e aceleram em muito, os mecanismos de desgastes termicamente ativados de ferramentas de corte.<sup>43</sup> Algumas avarias consequentes das altas temperaturas são: <sup>21</sup>

- Desgaste por deformação plástica da aresta de corte: causada pela alta pressão aplicada na ponta da ferramenta e pela elevada temperatura;
- Desgaste por trincas de origem térmicas ou mecânicas: gerados pela variação de temperatura e/ou de esforços mecânicos. Bastante característico do fresamento, por conta do corte interrompido.

Além disso, a elevação exagerada da temperatura contribui com mecanismos de desgaste de ferramentas:<sup>21</sup>

- Abrasão mecânica: favorecida pelo aumento da temperatura de corte somado à presença de partículas duras na peça;
- Difusão (transferência de átomos de um metal a outro): um fenômeno microscópico oriundo da temperatura da zona de corte;
- Oxidação: decorrente de elevadas temperaturas e pela presença de ar e água.

É devido ao desgaste e avarias intensificados pela elevação da temperatura de corte, que se faz necessário conhecer o modo com que o calor difunde nas ferramentas de corte. Por isso, o enfoque do presente trabalho nas propriedades termo-ópticas do material de insertos de Wc-Co.

## 2.6 TÉCNICAS FOTOACÚSTICAS

As técnicas fotoacústicas são técnicas não destrutivas usadas para determinar as propriedades térmicas e ópticas de uma amostra em estudo. A versatilidade dessas técnicas está no fato do sinal fotoacústico produzido ser dependente tanto da quantidade de calor gerado na amostra quanto de como esse calor se difunde na mesma. Fundamentadas no princípio fototérmico onde o estado

térmico do material é mudado através de uma luz incidida, estas técnicas oferecem duas possibilidades como técnicas de monitoramento. Uma possibilidade como técnica espectroscópica monitorando a evolução dos espectros fotoacústicos durante o período de processamento da amostra.<sup>44</sup> E, outra usando a técnica fototérmica para estudar como a difusão térmica é afetada por um dado tratamento na amostra<sup>45</sup>.

A Espectroscopia Fotoacústica (PAS) segue o modelo padrão proposto por Rosencwaig e Gersho, conhecido como o modelo RG, o qual consiste de uma pequena célula com gás e uma amostra em seu interior, à uma distância  $L_g$  de uma janela transparente de vedação, conforme a figura 6. Um feixe de luz modulada passa pela janela e incide na amostra. Um microfone capacitivo capta as flutuações de pressão no gás, resultante da transferência de calor originado pelo aquecimento periódico do material em estudo<sup>46</sup>.

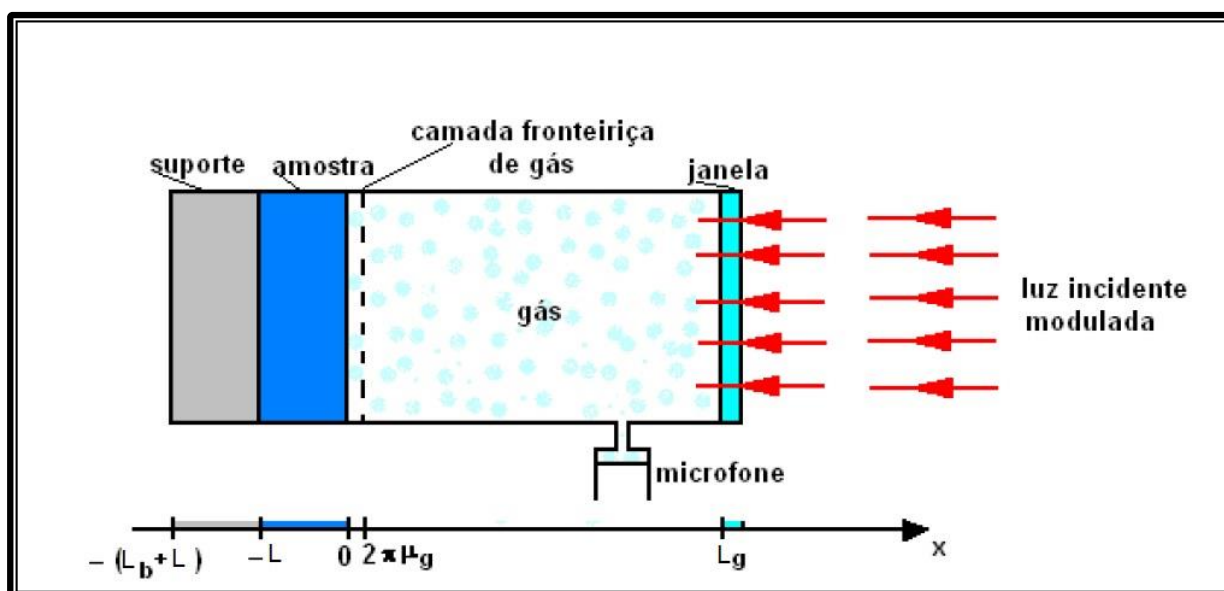


Figura 6 Modelo RG  
Fonte: Dias (2005).

Os pulsos de calor provocado pela luz incidente na amostra geram ondas acústicas no gás da câmara fotoacústica. Esses pulsos são caracterizados por três principais mecanismos: difusão térmica, expansão térmica e flexão termoelástica<sup>47</sup>.

No mecanismo da difusão térmica, a luz de frequência modulada é absorvida pela amostra e energia térmica é transferida. O processo é o de difusão, decorrente da transferência de calor na amostra por condução. Onde é o gás aquecido que sofre expansão e contração. Este mecanismo é característico em baixas frequências de modulação.



No mecanismo de expansão térmica, em decorrência do aquecimento gerado a amostra sofre uma expansão e posteriormente contração. Efeito comum em materiais com baixo coeficiente de absorção óptico.

Finalmente no mecanismo de flexão termoelástica, gradientes de temperatura fazem com que ondas elásticas se formem e se propaguem na extensão da amostra. Devido a um aquecimento não homogêneo da amostra e ao fato de as suas bordas estarem presas o efeito de curvatura termoelástica é formado. Este mecanismo é característico em altas frequências de modulação.

Quando o mecanismo de difusão térmica é predominante na geração do sinal fotoacústico a variação de pressão dentro da câmara fotoacústica segue a expressão:

$$\delta P(t) = \frac{\gamma P_0 \theta_s(0)}{\sqrt{2} l_g a_g T_0} \times e^{j(\omega t - \frac{\pi}{4})}, \quad (1)$$

em que,  $\gamma = C_p/C_v$  é a razão entre os calores específicos,  $T_0$  é a temperatura média na superfície da amostra,  $P_0$  é a pressão ambiente,  $l_g$  é a espessura do gás,  $\theta_s(0)$  é a temperatura na interface amostra - gás ( $x=0$ ),  $a_g$  é o coeficiente de difusão térmica do gás,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  é a frequência de modulação da radiação incidente.

A difusividade térmica indica como o calor se difunde através de um material, ela expressa a velocidade que um material tem de se ajustar por inteiro à temperatura no seu entorno. O parâmetro difusão de calor na amostra, ou seja, é a difusividade térmica ( $\alpha$ ):

$$\alpha = k/\rho C, \quad (2)$$

em que,  $k$  é a condutividade térmica, uma propriedade física dos materiais que descreve a habilidade do mesmo conduzir calor através de uma espessura, numa direção normal à superfície devido a um gradiente de temperatura;  $\rho$  a densidade a qual é definida pela razão da massa pelo volume, e  $C$  o calor específico à uma pressão constante definido pela quantidade de calor necessária para aquecer 1°C uma unidade de massa a uma dada temperatura.

A tabela 1 mostra as propriedades térmicas de alguns metais. A importância da medida da difusividade térmica é devida a este parâmetro ser único para cada material<sup>48</sup>, caracterizando fisicamente o “seu interior”. Além disso, sua determinação implica indiretamente na medida da condutividade térmica, desde que a densidade e o calor específico sejam conhecidos. Portanto, utilizando a segunda possibilidade de

monitoramento das técnicas fotoacústicas, nomeada como Técnica de Célula Fotoacústica Aberta (OPC – Open Photoacoustic Cell),<sup>49-50</sup> é possível explorar as medidas de difusividade térmica para o estudo de parâmetros tais como o grau de cristalinidade, a presença de impurezas e defeitos na microestrutura. Sabe-se que a difusão de calor em materiais depende intensamente da densidade e da natureza das imperfeições encontradas na rede cristalina. Deslocamentos, lacunas e o grau de cristalinidade e de reticulação<sup>47</sup>, como também, defeitos microestruturais (poros e rugosidades), afetam diretamente a difusão do calor. Impurezas, em alguns casos inibem o processo de difusão térmica, sendo assim tem-se que a eficiência e a qualidade de alguns materiais dependem desse processo de difusão térmica.<sup>45</sup>

**Tabela 1 Propriedades térmicas e físicas de alguns materiais.**

<b>Material</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor Específico (J.kg<sup>-1</sup>.k<sup>-1</sup>)</b>	<b>Condutividade Térmica (W.m<sup>-1</sup>.k<sup>-1</sup>)</b>	<b>Difusividade Térmica (cm<sup>2</sup>/s)</b>
<b>Alumínio (Puro)</b>	2700	945	238	0,9328
<b>Cobre (puro)</b>	8933	385	401	1,166
<b>Ferro (puro)</b>	7870	447	80,2	0,228
<b><u>Aço</u> (AISI 1010)</b>	7832	434	63,9	0,188
<b>Tungstênio</b>	19300	132	174	0,683

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

## 2.7 CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS COM BASE EM PRÂMETROS ÓPTICOS E TÉRMICOS

A equação que representa o sinal fotoacústico será dada pelo comportamento não temporal da equação 1. Pode-se perceber que esta equação não é trivial. No

entanto, o que atrai a utilização de técnicas fotoacústicas é que, dependendo das propriedades ópticas e térmicas do material, simplificações significativas podem ser feitas. Tais simplificações transformam-se em casos especiais que dependem da forma como as amostras podem ser classificadas, com base em parâmetros ópticos e térmicos, obtendo o respectivo sinal fotoacústico<sup>46</sup>.

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:

- $l_\beta \ll$  espessura da amostra  $\Rightarrow$  amostra opticamente opaca
- $l_\beta \approx$  espessura da amostra  $\Rightarrow$  amostra absorvedora
- $l_\beta \gg$  espessura da amostra  $\Rightarrow$  amostra opticamente transparente.

O parâmetro térmico é o comprimento de difusão térmica  $\mu_s$  que é à distância na qual uma amplitude de oscilação térmica, transmitida de uma fonte de calor, se atenua ao valor de 1/e na amplitude da fonte. Com isso,

- $\mu_s \ll$  espessura da amostra  $\Rightarrow$  amostra termicamente grossa
- $\mu_s \gg$  espessura da amostra  $\Rightarrow$  amostra termicamente fina

em que  $\mu = 1/a_i = \sqrt{2\alpha_i/\omega}$ .

A dependência de  $\mu_s$  com  $f$  (frequência de modulação da luz) também possibilita a variação de  $\mu_s$  e, portanto, uma amostra pode passar de termicamente fina para termicamente grossa aumentando-se a frequência de modulação  $f$ . Denomina-se frequência de corte ( $f_c$ ), a frequência na qual ocorre essa transição, e é dada por:

$$\mu_s = l \Rightarrow f_c = \frac{\alpha_s}{\pi l^2}. \quad (3)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção é feito um breve resumo das técnicas de avaliação e estudo, utilizadas no presente trabalho. As técnicas descritas são a OPC utilizada para se obter os valores da difusividade térmica, seguida do DRX e do MEV-EDS, utilizada para a caracterização estrutural dos insertos avaliados.

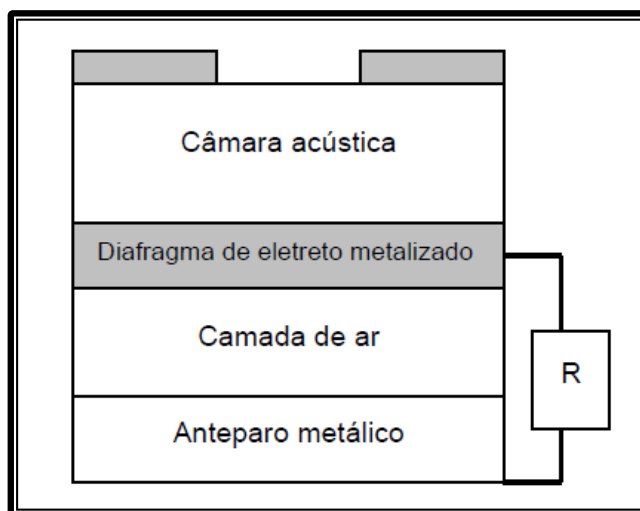
#### 3.1 MÉTODO DE CÉLULA FOTOACÚSTICA ABERTA - OPC

Para a obtenção de medidas de difusividade térmica dos insertos de metal duro o método fotoacústico utilizado é a OPC (do inglês, Open Photoacoustic Cell).<sup>51</sup>,<sup>52</sup> Diferente do modelo RG em que a luz incide primeiramente na camada de gás e em seguida na superfície da amostra, na OPC a incidência da luz modulada ocorre primeiramente na superfície frontal da amostra, ou seja, a transmissão se dá pela amostra. Portanto, na técnica OPC a incidência é traseira.

Na Técnica OPC se utiliza a câmara frontal interna de um microfone de eletreto comercial como câmara fotoacústica convencional. A amostra é montada diretamente sobre a superfície superior do microfone de eletreto, de modo que a câmara do microfone seja vedada. Sendo tal vedação reforçada pela aplicação da graxa de silicone para alto vácuo, o que além de ajudar na fixação da amostra evita o vazamento de ar no interior da célula fotoacústica. Ambos, microfone e amostra, são posicionados em frente à radiação, para que a amostra seja iluminada.

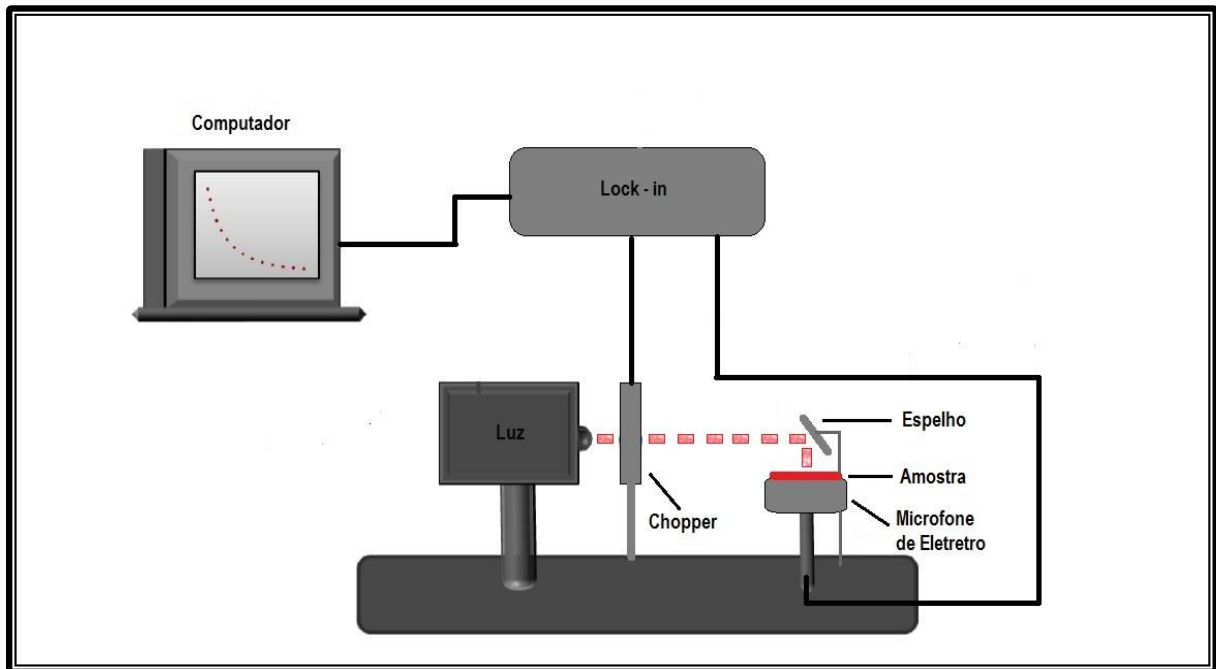
Como demonstrado na figura 7 o microfone de eletreto consiste basicamente de um fino diafragma de eletreto metalizado, uma camada de ar e uma placa de metal nas respectivas ordens. Na face superior se encontra um orifício circular, o qual deve ser obstruído pela amostra.<sup>49, 50, 53</sup> O sinal elétrico é gerado quando a onda sonora atinge a membrana do eletreto e provoca oscilações na espessura da camada de ar, alterando o campo elétrico e induzindo cargas nas camadas metálicas. As oscilações de pressão na câmara defletem a membrana e geram uma diferença de potencial devido à presença do resistor. De custo consideravelmente baixo, robustez e de simples mecanismo o microfone de eletreto se torna bastante vantajoso, porém, com a desvantagem da sua resposta não ser plana em função da frequência de modulação. Por esse motivo, se faz necessário a obtenção da curva resposta do microfone de

eletreto, a fim de possibilitar a sua aplicação em estudos de varredura em frequência. Apesar de não ser o foco do presente estudo é importante ressaltar que a calibração dos microfones de eletreto do Laboratório de Propriedades Termo-Ópticas (LAPTO), do Departamento Acadêmico de Física da UTFPR – câmpus Ponta Grossa foi feita e sua confiabilidade foi efetivamente comprovada.



**Figura 7 OPC: Desenho Esquemático do Microfone de Eletreto**  
Fonte: Paiva, 2006

O conjunto dos equipamentos que compõem a Técnica de Célula Fotoacústica Aberta para as medidas de difusividade térmica, pertencente ao LAPTO, pode ser visualizado conforme a figura 8.<sup>54</sup> A luz emitida pelo laser de estado sólido (635 nm, 25 mW da Coherent modelo Radius) é modulada pelo *chopper* (da Stanford Research Systems modelo SR540). Por intermédio de um espelho ótico, de 25 mm de diâmetro e foco de 50 mm, a radiação modulada é direcionada até a amostra no centro do microfone de eletreto. Tanto o *chopper* quanto o microfone são conectados ao *lock-in* (amplificador também da Stanford Research Systems modelo SR840) que transforma a variação de pressão medida pelo microfone em sinal fotoacústico amplificado. O gerenciamento e a aquisição de dados das varreduras de frequência são realizados por um computador conectado ao amplificador.



**Figura 8** Esquema experimental para a OPC utilizado no LAPTO da UTFPR – Ponta Grossa  
**Fonte:** A Autora.

Finalizado o experimento se extrai do programa de gerenciamento de dados o sinal ( $S$ ) gerado para cada frequência, que segue a expressão:

$$S = \frac{A}{f} \exp(-b\sqrt{f}), \quad (4)$$

para uma amostra termicamente grossa ( $\mu_s \ll$  espessura da amostra) e opaca. Em seguida, o sinal é tratado com o auxílio de um programa matemático. Primeiramente é feita a correção do sinal obtido, usando  $S/\chi$ , onde  $\chi$  é a função resposta do microfone de eletreto, dada por:

$$\bar{\chi} = |\chi^* \chi|^{1/2} = \frac{\omega \tau_E}{[1 + (\omega \tau_E)^2]^{1/2}}, \quad (5)$$

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

O valor da difusividade térmica é obtida fazendo o ajuste da equação 4, uma vez que, conhecendo a espessura do material:

$$\alpha = \frac{\pi L^2}{b^2}. \quad (6)$$

A OPC é uma técnica que não exige muita preparação da amostra a ser avaliada. Portanto para o presente estudo as amostras de insertos de Metal Duro foram cortadas por uma serra de alta precisão, obtendo para o inserto X uma amostra de 505  $\mu\text{m}$  de espessura e o inserto Y 655  $\mu\text{m}$  de espessura, ambas medidas com o auxílio de um micrômetro.

A varredura de frequência para as medidas do sinal fotoacústico foi de 25-55 Hz, de 1 em 1 Hz e numa média de 10 pontos para cada frequência. Para cada amostra foi realizado o experimento de varredura quatorze vezes. A amostra era retirada do microfone para posteriormente executar uma varredura de modo a intercalar o experimento entre a amostra X e Y.

### 3.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A Difração de Raios X (DRX) é utilizada devido à sua capacidade de determinar as fases cristalinas do material. Comumente utilizada na caracterização microestrutural de materiais cristalinos. Ao incidir um feixe de raios X em um cristal, ocorre uma interação com os átomos presentes, resultando no fenômeno de difração. A lei de Bragg (equação 7) <sup>55</sup> define a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que originaram, comportamento específico para cada fase cristalina.

$$n\lambda=2d \sin \theta \quad (7)$$

O objetivo principal da análise por difração de raios X foi verificar as fases presentes nas amostras X e Y. O equipamento utilizado foi o Rigaku – Ultima IV pertencente ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-Labmu) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). O espectro de difração foi medido usando uma fonte de Cu K $\alpha$  ( $\lambda_{K\alpha 1} = 1,54046 \text{ \AA}$ ), 40Kv e 30mA e de varredura contínua de  $2\theta$  5° a 80°.

### 3.3 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV-EDS)

Para a compreensão da microestrutura das amostras X e Y uma caracterização do material com o auxílio do MEV foi realizada em conjunto com o EDS para a determinação da composição. O MEV explora a superfície da amostra por um feixe de elétrons de pequeno diâmetro e transmite o sinal do detector para uma tela catódica sincronizada com o feixe incidente<sup>56</sup> e o EDS determina a composição da amostra por intermédio da emissão de raios X característicos. As imagens em MEV foram obtidas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do

Departamento de Engenharia de Materiais, da UEPG usando um equipamento da Shimadzu, modelo SSX – 550.

### 3.4 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras utilizadas foram extraídas de dois insertos de Metal Duro de fabricantes diferentes, ambos utilizados no processo de fresamento para usinagem de aços. Os nomes dos fabricantes são omitidos e por isso são denominados como Fabricante X e Fabricante Y. É importante salientar que as análises foram focadas no substrato dos insertos, isto é, na camada interna não coberta pelo revestimento.

Para que os ensaios fossem realizados, os insertos foram seccionados no Laboratório de Metalografia da UTFPR – Ponta Grossa, com o auxílio de uma máquina de corte de precisão, BUEHLER modelo IsoMet 4000, disco de corte de diamante de 15 HC e 4000 rpm. A fotografia 1 mostra a geometrias das ferramentas de corte e seu respectivo seccionamento.



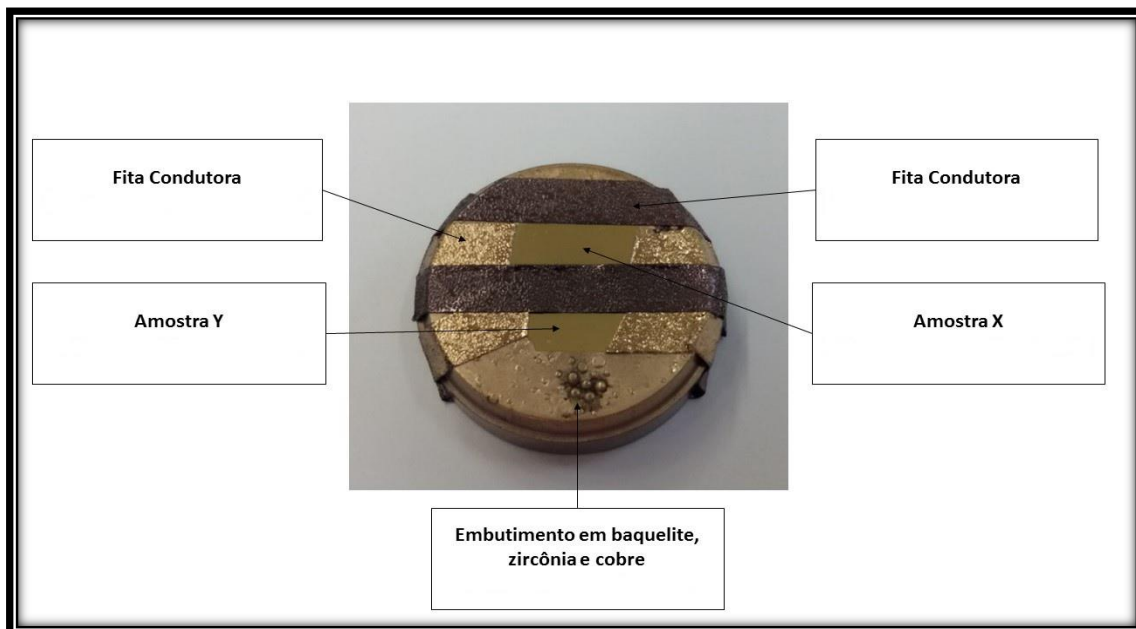
**Fotografia 1 Amostras seccionadas dos insertos: (a) Fabricante X e (b) Fabricante Y**  
Fonte: A Autora.

Para as medidas em fotoacústica e por difração de raios-X as amostras cortadas foram analisadas sem tratamento. Para as medidas de difusividade térmica via OPC cada lado das amostras obtidas a partir do seccionamento dos insertos foram descritos como lado A e lado B, representando a iluminação da face da amostra em cada.

Por outro lado, para o MEV-EDS as amostras cortadas foram embutidas em baquelite com zircônia e cobre; seguido de polimento com lixa de granulometria 120 e 635, finalizado com pasta de diamante. Contudo, a condutividade elétrica limitada



desse material faz com que seja difícil analisar no MEV. Portanto, para possibilitar a condutividade elétrica foi aplicado uma fita condutora nas amostras embutidas e eletrodeposição de ouro, conforme a fotografia 2.



**Fotografia 2** mostras embutidas e tratadas para análise no MEV-EDS  
Fonte: A Autora.

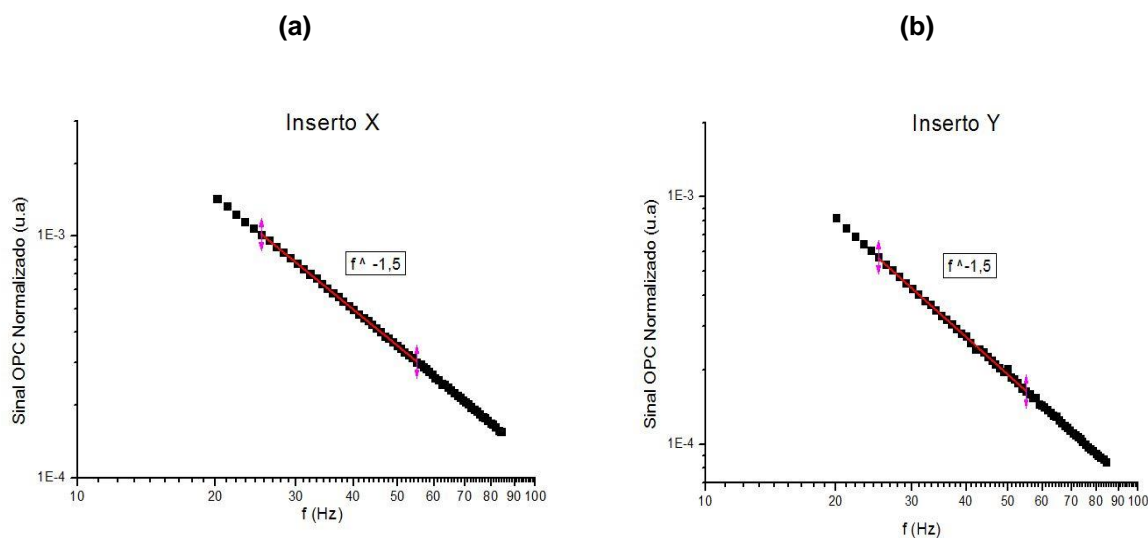
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é apresentado e discutido os resultados do presente trabalho. Os resultados foram obtidos por meio da análise da propriedade térmica de difusividade térmica via OPC das duas amostras de inserto de metal duro de fabricantes diferentes. Sendo tais medidas de difusividade térmica discutidas com base na avaliação da microestrutura por meio do DRX e MEV-EDS.

### 4.1 DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A propriedade térmica de difusividade térmica dos insertos de metal duro foi obtida por meio da técnica de célula fotoacústica aberta (OPC). As medidas de varreduras de frequência ocorreram de forma padronizada de maneira a garantir uma similaridade nos ensaios e resultados da difusividade térmica. As amostras X e Y foram avaliadas incidindo-se a luz modulada perpendicular às amostras, em varreduras realizadas para cada lado da amostra.

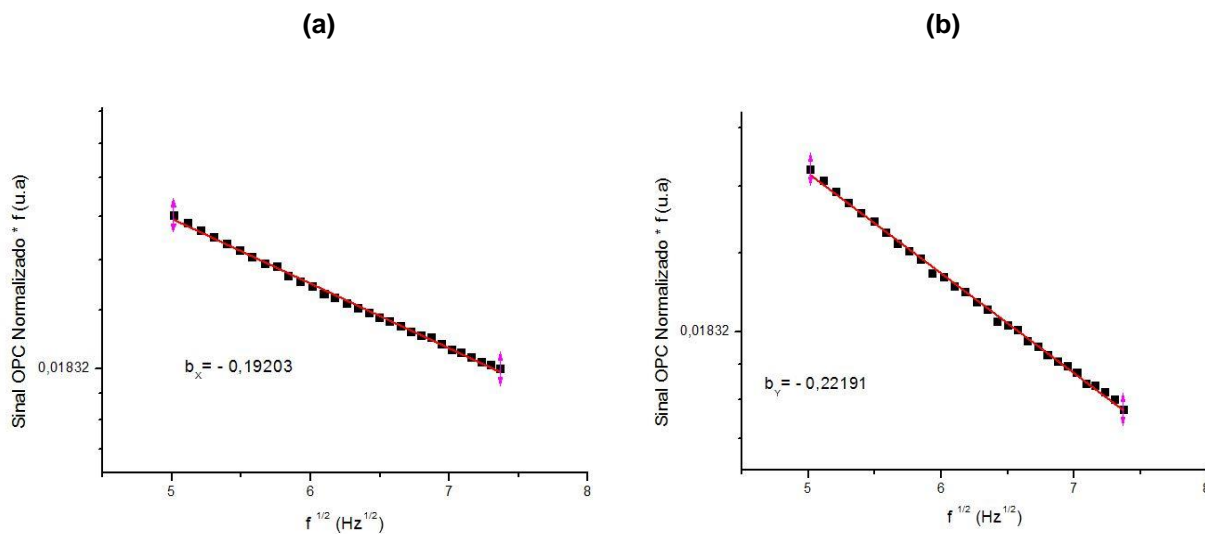
Primeiramente os experimentos em OPC foram realizados na região de frequência de modulação 20-85 Hz. Na figura 9 é demonstrado a amplitude do sinal fotoacústico normalizado para os insertos X e Y numa escala logarítmica, onde é comprovado que o modelo de difusão térmica ( $f^{-1,5}$ ) é válido na faixa de 25-55 Hz, para uma amostra termicamente grossa.<sup>48</sup> Portanto, repetições e outras varreduras de frequência foram realizadas apenas nesta faixa. No regime termicamente grosso para frequências altas (maiores que 100 Hz) a amplitude do sinal fotoacústico é dominada pelo mecanismo de flexão termoelástica ( $f^{-1}$ ), porém, isto é relevante nas frequências superiores à utilizadas no ajuste do presente trabalho e sendo assim, pode ser experimentalmente ignorado.<sup>52</sup>



**Figura 9 Amplitude do sinal PA normalizado em função da frequência de modulação para os insertos: (a) X e (b) Y.**

**Fonte: A Autora**

Para se obter o valor da difusividade (equação 6) foi plotado um gráfico semi-logarítmico da amplitude normalizada para os insertos X e Y em função da raiz quadrada da frequência de modulação, conforme a figura 10 (a) para o inserto de Fabricante X e figura 10 (b) para o de Fabricante Y. Na região de frequência 25-55 Hz, a amplitude do sinal fotoacústico teve seu comportamento exponencial, (equação 4), como previsto pelo modelo de difusão térmica para uma amostra termicamente grossa. O ajuste do gráfico  $\ln\left(\frac{S}{\chi}\right) f \times \sqrt{f}$  possibilitou encontrar a variável b (coeficiente angular da reta após realizado a linearização do gráfico). Conforme a figura 10 (a) a amostra X apresentou um  $b_X = -0,19203$  e a amostra Y (figura 10 (b))  $b_Y = -0,22191$ . Uma vez conhecido os respectivos valores do coeficiente angular b e as espessuras dos materiais define-se o valor da difusividade térmica para cada inserto avaliado (equação 6).



**Figura 10 Ajuste linear de  $S/\chi^*f$  em função de  $f^{1/2}$ , para os insertos: (a) Fabricante X e (b) Fabricante Y**  
**Fonte: A Autora.**

Na tabela 2 estão dispostos os vinte e oito resultados da difusividade térmica. Para cada amostra foi realizada, sendo sete medidas em cada lado dos insertos. A tabela 2 também apresenta a média dos resultados para cada inserto calculada. Calculou-se o erro desta propriedade térmica por meio de propagação de erros.

Tabela 2 Resultados da Difusividade Térmica dos Insertos X e Y

Amostra	Espessura ( $\mu\text{m}$ )	Lado	B	Difusividade ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	Difusividade média ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	
X	505	A	0,21591	0,17186	0,188 $\pm$ 0,007	0,194 $\pm$ 0,007
			0,21807	0,16847		
			0,21905	0,16697		
			0,21346	0,17583		
			0,18842	0,22567		
			0,1992	0,2019		
			0,19898	0,20235		
		B	0,20861	0,1841	0,200 $\pm$ 0,007	
			0,19203	0,21726		
			0,21923	0,16669		
			0,21079	0,18031		
			0,18698	0,22916		
			0,19579	0,209		
			0,1943	0,21221		
Y	655	A	0,21572	0,28963	0,258 $\pm$ 0,009	0,263 $\pm$ 0,009
			0,23393	0,24629		
			0,22878	0,2575		
			0,23155	0,25138		
			0,23066	0,25332		
			0,23317	0,2479		
			0,22837	0,25843		
		B	0,23562	0,24277	0,265 $\pm$ 0,009	
			0,22404	0,26851		
			0,23456	0,24497		
			0,21923	0,28043		
			0,21413	0,29394		
			0,23134	0,25184		
			0,22191	0,27369		

Fonte: A Autora

Os resultados da tabela 2 mostram uma similaridade das medidas das duas faces avaliadas de cada inserto, sugerindo que se tratam do mesmo material. Todavia, no que diz respeito ao resultado das medidas dos insertos X e Y, conforme exposto na tabela 2, há uma diferença de 36% na difusividade térmica, onde o valor para X é  $0,194 \pm 0,007 \text{ cm}^2/\text{s}$  e Y é  $0,263 \pm 0,009 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Comparando os resultados obtidos dos insertos de Metal Duro com os valores da difusividade térmica para cada material descrito na tabela 1 percebe-se que os valores dos insertos ficaram próximos ao do ferro (puro) e ao Aço (AISI 1010),  $0,228 \text{ cm}^2/\text{s}$  e  $0,188 \text{ cm}^2/\text{s}$ , respectivamente.

Na tabela 3 são dispostos os valores da difusividade térmica, encontradas na literatura, de amostras sinterizadas de WC-Co, via técnica OPC<sup>57, 58</sup> e via método Flash-Laser.<sup>59, 60</sup> Porém, para as amostras do presente trabalho, referente aos fabricantes de insertos convencionais há a presença de outros materiais além do WC-CO, como por exemplo o TiC, TaC e NbC, ainda que tais não tenham sido encontrados pelas técnicas complementares. Enquanto o material dos estudos descritos na tabela 3 são compostos apenas de WC-Co.

**Tabela 3 Valores de difusividade térmica encontrados na literatura para amostras sinterizadas**

Amostra	Técnica	$\alpha \text{ (cm}^2/\text{s)}$	Referência
<b>Wc-10%pCo Convencional (1450°C/60min/10<sup>-2</sup>tor)</b>	OPC	0,456±0,041	57
<b>Wc-10%pCo (5GPa/1200°C/1min)</b>		0,340±0,005	
<b>Wc-10%pCo (5GPa/1200°C/2min)</b>		0,380±0,023	
<b>Wc-10%pCo (5GPa/1300°C/1min)</b>		0,270±0,046	
<b>Wc-10%pCo (5GPa/1300°C/2min)</b>		0,250±0,013	
<b>Wc-10%pCo (5GPa/1400°C/1min)</b>		0,370±0,030	
<b>Wc-10%pCo (5GPa/1400°C/2min)</b>		0,400±0,006	
<b>Wc-15%pCo (5GPa/1350°C/2min)</b>	OPC	0,35	58

Amostra	Técnica	$\alpha$ (cm <sup>2</sup> /s)	Referência
Wc-6%pCo	1000°C Flash-Laser	0,32	59
Wc-8%p(Co75%pNi)	Flash-Laser	0,205	60

Fonte: A Autora

A técnica OPC realizada no LAPTO, da UTFPR – Ponta Grossa demonstra grande confiabilidade nos resultados obtidos nos ensaios executados. Esta confiabilidade foi comprovada através de resultados da difusividade térmica, obtidos neste laboratório para um alumínio de elevada pureza cujo valor médio foi de  $(0,934 \pm 0,003)$  cm<sup>2</sup>/s.<sup>54</sup> Este valor é bem próximo do valor encontrado na literatura de 0,9328 cm<sup>2</sup>/s, conforme já mostrado na tabela 1.<sup>48</sup>

#### 4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

Na análise de raios X as amostras pertinentes aos insertos X e Y foram examinadas de modo qualitativo, cujo intuito foi o de verificar as fases presentes. Na figura 11 (a) e (b) é exposto o difratograma de raios X para as duas amostras avaliada do Fabricante X e Y, respectivamente.

Observa-se a similitude entre os dois difratogramas de raios X. A fase do primeiro pico não foi identificada, a mesma pode se tratar de uma solução, ou seja, a formação de uma estrutura não estável resultante do processo de fabricação dos insertos. O segundo e o terceiro pico são relativos ao carbonilo de cobalto (Co<sub>2</sub>(CO)<sub>8</sub>); o quarto e quinto ao óxido de tungstênio (WO<sub>3</sub>). Do sexto pico em diante a fase foi identificada como carboneto de tungstênios (WC). O diferencial entre os difratogramas das figuras 11 (a) e 11 (b), está na intensidade das fases, o que é evidenciado no primeiro pico não identificado e nos picos de Co<sub>2</sub>(CO)<sub>8</sub>, onde o segundo pico da amostra Y é aproximadamente 55,6% superior à X.

Além disso, percebe-se que os difratogramas dos respectivos fabricantes comerciais, X e Y, se assemelham aos de carbetos cementados, WC-Co, sinterizados. Trabalhos anteriores resultaram em difratogramas de WC-Co similares ao da figura

11 especialmente nos picos respectivos ao WC, em  $2\theta$  igual a 65 e  $2\theta$  igual a 75.<sup>57, 61,</sup>

62

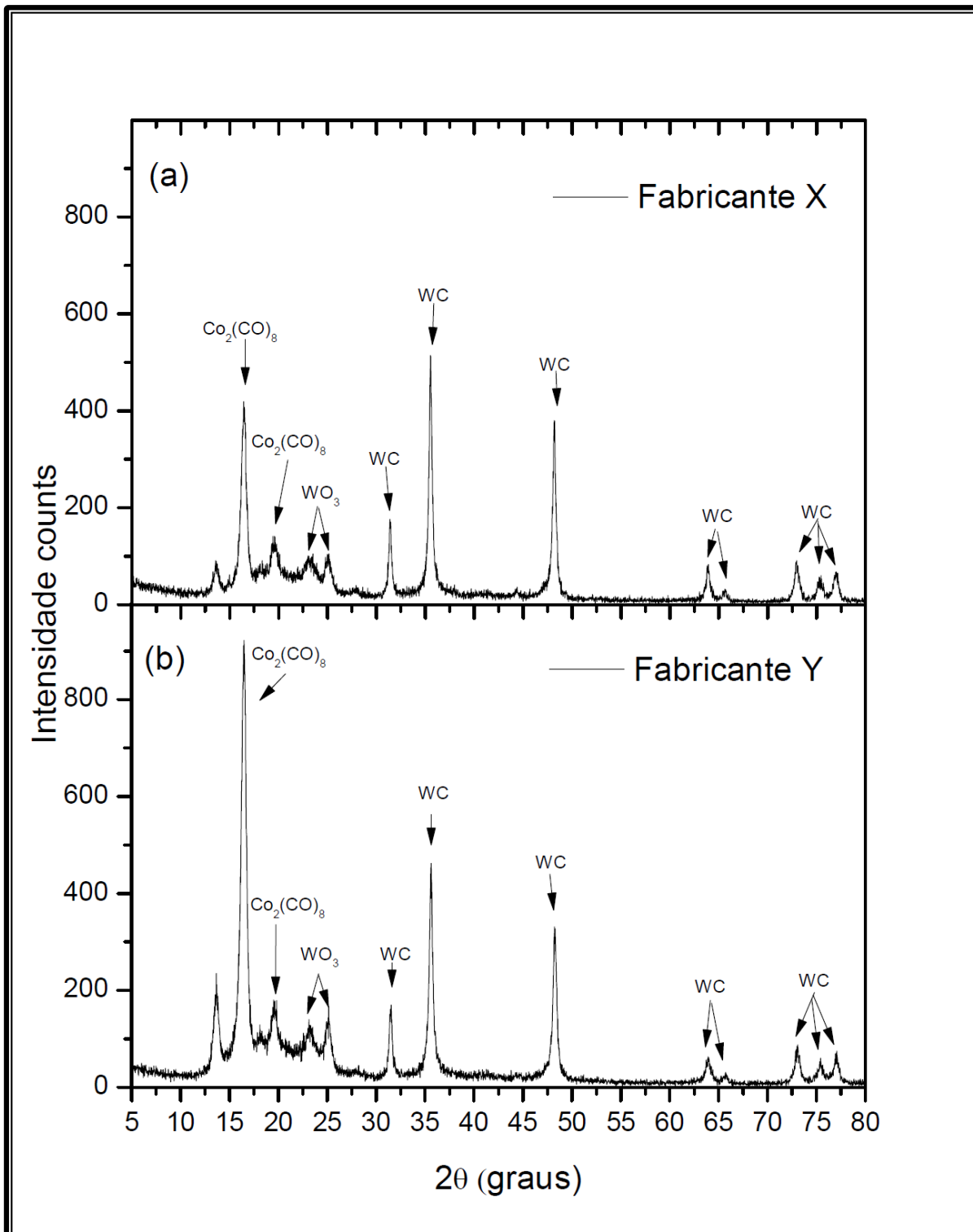


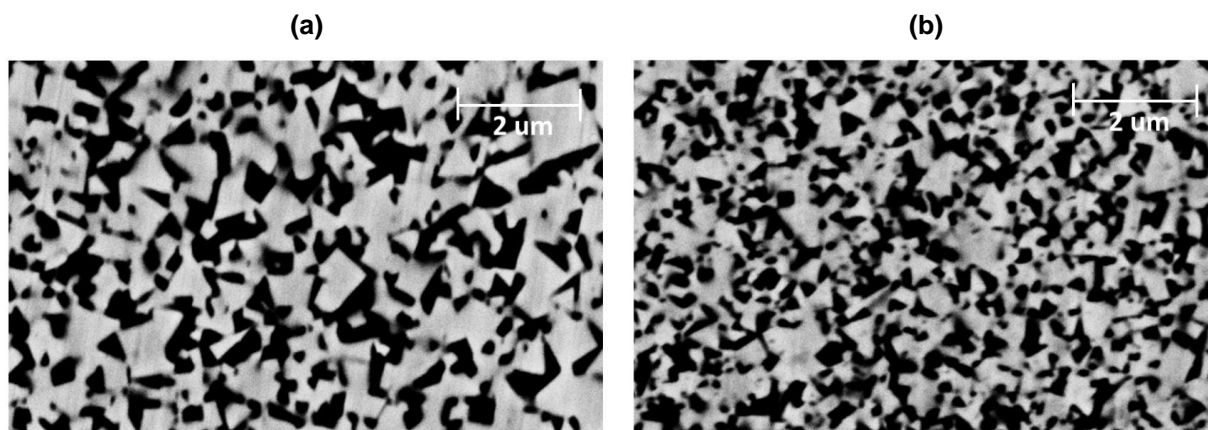
Figura 11 Difratoograma de raios-x para os insertos: (a) X e (b) Y  
Fonte: A Autora.



### 4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – ESPECTRÔMETRO DE RAIOS X POR DISPERSÃO DE ENERGIA (MEV-EDS)

Com o auxílio do MEV foram averiguados a morfologia e o tamanho das partículas dos insertos X e Y, qualitativamente. Além disso, a técnica EDS foi utilizada para análise química de ambas as amostras. As figuras 12 (a) e 12 (b) representam a micrografia das amostras X e Y respectivamente, ambas são comparadas com o intuito de avaliar a particularidade de cada microestrutura.

Na micrografia do fabricante X, conforme figura 12 (a), se observa um maior crescimento dos grãos se comparado ao Fabricante Y. A imagem da microestrutura referente ao Fabricante Y, figura 12 (b), apresenta uma microestrutura mais refinada e com grãos mais reduzidos.<sup>57</sup>



**Figura 12** Microscopia Eletrônica e Varredura, 25kV, x5000, SBSE das amostras de: (a) Fabricante X e (b) Fabricante Y  
Fonte: A Autora

A diferença no modo com que esses grãos estão ordenados em toda microestrutura é resultado do controle dos parâmetros do processo de sinterização do metal duro, ou seja, temperatura e pressão ideais.<sup>35, 57, 58, 59, 60</sup>

Os resultados obtidos na OPC são justificados pela microscopia no MEV. A difusividade térmica é diretamente relacionada à morfologia da amostra e na característica da microestrutura do material. Dado ao fato, de que deslocamentos, lacunas, grau de cristalinidade, defeitos micro estruturais como poros e rugosidades, afetam em muito a difusão do calor no material. Na imagem 12 (b) obtida pelo MEV da amostra Y constata-se que sua microestrutura é mais refinada, com pouquíssimo crescimento dos grãos, características proporcionadas durante o processo de

sinterização do inserto, contribuindo para uma difusividade térmica de  $0,263 \pm 0,009$   $\text{cm}^2/\text{s}$ , 36% superior ao valor do fabricante X.<sup>57</sup>

Também, com o propósito de identificar os elementos presentes nas amostras de inserto de metal duro foi utilizado o EDS acoplado ao MEV que resultou os gráficos apresentados nas figuras 13 (a) e (b). Em ambas amostras foi evidenciada a presença do W, Co e pequena concentração, provavelmente residual, de Cr. Porém, repara-se que a diferença das quantidades dos elementos W e Co, entre as amostras é mínima (tabela 4), com base nisso, se pode propor que ambas amostras são praticamente iguais em seus componentes.

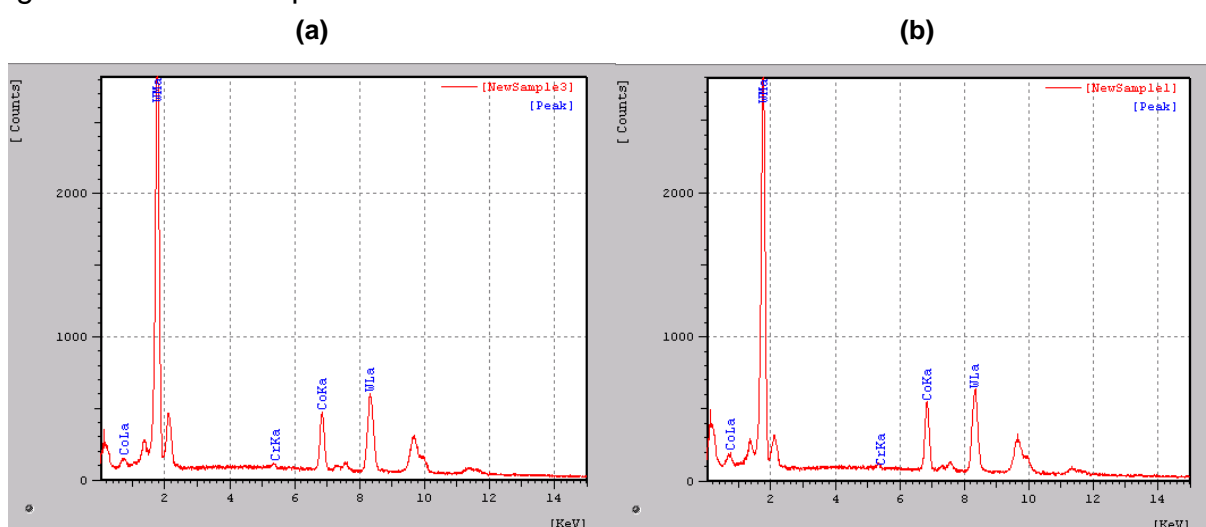


Figura 13 EDS das amostras de: (a) Fabricante X e (b) Fabricante Y  
Fonte: A Autora

Tabela 4 Composição química dos Insertos X e Y

Amostra	Elementos em peso (%)			
	W	Co	Cr	Total
X	88,358	10,957	0,505	100
Y	87,763	12,076	0,161	100

Fonte: A Autora

De um modo geral, embora a difusividade térmica dos dois insertos apresentarem valores diferentes eles são semelhantes em sua composição. Entende-se que não é possível dizer qual fabricante é o melhor somente com base no aspecto da difusão do calor. Ainda que se saiba que em usinagem a seco, onde devido alta temperatura de trabalho há a redução da vida da ferramenta<sup>28</sup> e uma eficaz dissipação

térmica através da ferramenta torna a distribuição de temperatura mais uniforme evitando falha da ferramenta por concentração de calor.<sup>33, 59</sup> Pois, são vários os fatores que influenciam na progressão do desgaste da ferramenta, são eles: condições de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e geometria da ferramenta.<sup>21</sup>

## 5 CONCLUSÕES

A técnica OPC possibilitou o estudo do modo com que o calor é difundido em insertos de metal duro comerciais, de dois fabricantes diferentes destinados ao processo de fresamento. Os valores da difusividade térmica encontrados para cada inserto de Wc-Co foi de  $0,194 \pm 0,007 \text{ cm}^2/\text{s}$  para o fabricante X e  $0,263 \pm 0,009 \text{ cm}^2/\text{s}$  para o fabricante Y, uma diferença de 35,56% entre seus valores.

Apesar, disso notou-se que ambas ferramentas de corte são muito parecidas. A técnica de raios X realizada, resultou em difratogramas de grande semelhança entre os fabricantes, tendo somente a diferença na intensidade. Onde evidenciou que o pico de  $\text{Co}_2(\text{CO})_8$  da amostra do fabricante Y é aproximadamente 55,6% superior a X.

Por outro lado, avaliando as imagens da microestrutura com o auxílio do MEV constatou-se que a particularidade do inserto Y, comparado ao inserto X, está em que o primeiro tem uma estrutura mais refinada e de pouco crescimento dos grãos. Sugerindo que esta característica possa ser responsável por explicar o valor da difusividade térmica para amostra Y ser maior do que a amostra X. Fato não explicado pela análise dos componentes presentes em cada inserto via EDS. Uma vez que, os componentes químicos encontrados foram o W, Co e o um Cr residual em ambas as ferramentas.

Como o controle de qualidade para a ferramenta de corte não foi definida com o presente trabalho há algumas sugestões para trabalhos futuros. Realizar um estudo termo-óptico e microestrutural em mais uma amostra do inserto de Fabricante Y, porém, com espessura diferente das apresentadas no presente trabalho, e em um outro inserto de um terceiro fabricante distinto (amostra Z) aplicado no fresamento de aços. Este estudo também deve ser dirigido para a cobertura dos insertos, uma vez que a função desta é aumentar a resistência ao calor. Fazer uma análise por raios X utilizando o método de Rietveld. Determinar o calor específico e a efusividade térmica dos insertos comerciais de Metal Duro. E ainda, relacionar a difusividade térmica ao tempo de vida de uma ferramenta de corte

## REFERÊNCIAS

- 1 DAVOODI, B. et al. Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid. **Journal of Cleaner Production**, v 68, p 234-242. 2014
- 2 CANTELI, J. A. et al. Cutting performance of TiCN-HSS cermet in dry machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v.210, p. 122-128, 2010.
- 3 FRATILA, D. Macro-level environmental comparison of near-dry machining and flood machining. **Journal of Cleaner Production**, v.18, p. 1031-1039, 2010.
- 4 TAWAKOLI, T. et al. Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant–lubricant types. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 50, p. 698-708, 2010.
- 5 GOMEZ, H. et al. Adhesion analysis and dry machining performance of CVD diamond coatings deposited on surface modified WC-Co turning inserts. **Journal of Materials Processing Technology**, v 212, p 523-533. 2012
- 6 JIANG, Z. et al. Optimization of Machining Parameters Considering Minimum Cutting Fluid Consumption, **Journal of Cleaner Production**, v.108, p183-191. 2015
- 7 LIU, J.; CHOU, Y. K. On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al–Si alloys with vortex-tube cooling, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v 47, p 635–645. 2007
- 8 SHARMA, V.S. et al. Cooling techniques for improved productivity in turning, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v 49, p 435-453. 2009
- 9 BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W.A.; **Fundamentals of Machining and Machine Tools**, 3 ed, New York: CRC Taylor & Francis, 2006
- 10 SOUZA, A. J.; ENG03343 – **Processos de Fabricação por Usinagem**, Parte 1: Fundamentos da usinagem dos materiais, Rio Grande do Sul: GPFAI-DEMEC-UFGRS/Apostila, 2011.

11 GRZESIK, Wit; *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications*. **Elsevier**, 2008.

12 MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R.T.; Silva, M. B.; **Teoria da Usinagem dos Materiais**, 2.ed, São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

13 DAVIM, J.P.; *Machining of Hard Materials*. **London: Springer**, 2011

14 CASTRO, C. D. M. et al. Impactos da aplicação dos conceitos e ferramentas da produção enxuta na busca por uma produção mais limpa: um estudo de caso numa indústria de bens de capital. **VI EMEPRO**, Coronel Fabriciano, Minas Gerais, 2010.

15 THEPSONTHI, T. et al. Investigation into minimal-cutting-fluid application in high-speed milling of hardened steel using carbide mills. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, p. 156-162, 2009.

16 KLINE, Company, I., **Competitive Intelligence for the Global Lubricants Industry 2004 e 2014**, 2006.

17 TAWAKOLI, T et al.; Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication - MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, p. 521-531, 2010.

18 DEBNATH, S. et al. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33-47, 2014.

19 LAWAL, S.A. et al.; A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. **J. Clean. Prod.** v. 41, p. 210-221, 2013.

20 DUDZINSKI, D. et al; A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 44, p. 439-456, 2004.

21 DINIZ, A. E., MARCONDES F. C., COPPININ. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 7ed, São Paulo: Artiber Editora, 2010.

22 STEMMER, C.E., **Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. Florianópolis: Editora Daufsc, 1992.

23 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORAS TÉCNICAS. **NBR 6175: Processos mecânicos de usinagem**. Rio de Janeiro, 1971. 19p

24 MILITÃO, M. **Fundamentos do Fresamento: uma aplicação em microfresamento**. 2013. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlo, 2013.

25 SANDVIK CORMANT. **Manual Técnico**. Disponível em: <<http://sandvik.coromant.com>>. Acesso em: 01 de maio de 2016.

26 CHIAVERINI, V.; **Tecnologia Mecânica**, 2.ed, São Paulo: McGraw-Hill, 1987

27 SANDVIK. **Technical Guide**: Turning, Milling, Drilling, Boring, Tool Holding. 2011

28 DENG JX et al. Wear lubrication and matching of cutting tools with the work piece materials. **Chinese J Mech Eng**, v.38, p.40–45, 2002.

29 RENEVIER NM et al, Advantages of using self-lubricating, hard, wear-resistant MoS<sub>2</sub>-based coatings. **Surf Coat Tech**, p.142–144, 2001.

30 NOVASKI, O. and DÖRR, J., Usinagem sem Refrigeração, **Revista Máquinas e Metais**, Aranda Editora, v. 398, pp. 18-27; 1999.

31 RENEVIER NM et al, Performance and limitation of hybrid PECVD (hard coating)-PVD magnetron sputtering (MoS<sub>2</sub>/Ti composite) coated inserts tested for dry high speed milling of steel and grey cast iron. **Surf Coat Tech**, p. 163–164, 2003.

32 RENEVIER NM et al. Performance and limitations of MoS<sub>2</sub>/Ti composite coated inserts. **Surf Coat Tech**, v.172, p. 13–23, 2003.

33 ESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Carlos, Editora Edgard Blucher Ltda. 1969.

34 TRENT, Edward M.; WRIGHT, Paul K.. **Metal Cutting**. 4. ed. Boston: Butterworth-heinemann, 2000.

35 BISCAIA, R., **Análise da Microestrutura e Microdureza de Ferramentas de Metal-duro para torneamento de acabamento**, 2013, Monografia (Engenharia Mecânica), UTFPR – Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2013

36 RODRIGUES, M.F., **Sinterização Termobária da Lica de Metal Duro WC-10%pCo**, 2006, Tese (Mestrado em Ciência dos Materiais), Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, Campos dos Goytacazes, 2006.

37 CHANG, S. et al, Materials Science & Engineering a Investigation into the sintered behavior and properties of nanostructured WC – Co – Ni – Fe hard metal alloys. **Materials Science & Engineering A**, v.606, p.150-156. 2014

38 TORRES, C. S., **Estudo da moagem de alta energia e sinterização de metal duro WC-Ni**, 2009.Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,2009.

39 DENG JX et al, Friction and wear behaviors of the PVD ZrN coated carbide in sliding wear tests and in machining processes, **Wear**, v.264, p. 298–307, 2008.

36 JESUS, E.C.J.; **Avaliação dos esforços, temperatura e integridade superficial em torneamento do aço inoxidável super duplex uns S32760 quando alterado o ângulo de posição da ferramenta e os parâmetros de corte,2013**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de São João Del Rei, São José Del Rei, 2013.

37 FERNANDES C.M.. SENOS, A.; Cemented Carbide Phase Diagrams: A Review. **Int J Refrac Met Hard Mater**, v. 29, p. 405-418, 2011.

38 MOSBAH A.Y. et al, Abrasive wear of WC–FeAl composites. **Wear**, v.258, p.1337–1341, 2005.

39 AHMADIAN M. et al, Abrasive wear of WC–FeAl–B and WC–Ni3Al–B composites. **Int J Refract Met Hard Mater**, v.23, p.155–159, 2005.



40 ABDEL-AAL, H.A. et al, Influence of thermal conductivity on wear when machining titanium alloys. **J.Tribology International**, v.42, p.359-372, 2009

41 ABDEL-AAL, H.A. et al, The Effect of thermal property degradation on wear WC-Co inserts dry cutting, **J.Wear**, v.265, p.1670-1679, 2008

42 BIERMANN, D. et al, New coating systems for temperature monitoring in turning processes, **Surface & Coatings Technology**, v.215, p.376-380, 2013.

43 MACHADO, A.R. e DA SILVA, M.B., **Usinagem dos Metais**, Apostila, Universidade Federal de Uberlândia - EDUFU, p.172, 1998.

44 DIAS, D. T. et al., Diamond & Related Materials Photoacoustic spectroscopy and thermal diffusivity measurement on hydrogenated amorphous carbon thin films deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition, **Diamond & Related Materials Journal**, v.48, p.1-5, 2014.

45 ZIEGLER G., HASSELMAN. D. P. H., J. Mat. Sci. v. 16, p. 495, 1981.

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

47 DIAS, D.T., **Caracterização óptica e térmica de materiais poliméricos via métodos Fototérmicos**, 2005, Tese (Doutorado em Física) – Departamento de Física, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.

48 ALMOND, D. P.; PATEL, P. M. Photothermal Science and Techniques. **London**, Vol. 10, 1996, p. 130.

49 SILVA, M. D.; BANDEIRA, I. N.; MIRANDA. L. C. M., **J. Phys. E: Sci. Instrum.** v.20, p.1476. 1987.

50 PERONDI, L. F., MIRANDA, L. C. M., **J. Appl. Phys**, v.62, p. 2955, 1987.

51 CESAR, C. L.; VARGAS, H.; MEYER, J. A.; MIRANDA, L. C. M. Photoacoustic Effect in Solids. **Physical Review Letters**. v. 42, n. 23, p. 1570-1573. 1979.

52 SOMER, A.; **Influência da Flexão Termoelástica na Medida da Difusividade Térmica de Amostra de Alumínio**. Dissertação (Mestrado em Física) – Departamento de Física, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2012.

53 PAIVA, R.; BARJA, P. **Células Fotoacústicas para Medidas em Sistemas Biológicos**. X Encontro Latino de I.C e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade de Vale da Paraíba.

54 FERREIRA, T. **Desenvolvimento de camadas ricas no intermetálico  $\alpha\text{-Al}_x(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr})_y\text{Si}_z$  em ligas Al-Si por solidificação controlada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Departamento de Mecânica, UTFPR-Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2016.

55 FILHO, H.D.F; LOPES, G.A.C; Avanços em caracterização de amostras sólidas cristalinas através de Difractometria de Raios-X, **Estação Científica UNIFAP**. v.3, n.1, p. 31-45, 2013

56 DEDAVID, B.A, et al, **Microscopia eletrônica de varredura – Aplicações e preparação de amostras**, Porto Alegre, EDPUCRS, 2007

57 MACHADO, F.A, **Caracterização Térmica da Liga de Metal Duro WC-10%pCo utilizando Técnicas Fototérmicas**, Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais) Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2007.

58 FARIA, T. et al, On the thermal characterization of a HPHT sintered WC-15% wt Co hardmetal alloy , **J. Refractory Metal e Hard Materials**, v.23, p. 115-118, 2005.

59 MIRANZO, P. et al, Thermal Conductivity enhancement in cutting tools by chemical vapor deposition diamond coating, **J. Diamond and Related Materials**, v.11, p. 703-707, 2002.

60 Li Z, Baoqi S. A new hardmetal for mining with Ni–Co binder. **Int J Ref Met Hard Mater**; v.14, p.245–248, 1996.

61 MARQUES, C.M et al, Análise de fases por difração de raios X de WC-10%Co dopado com terras-raras obtido sob alta pressão, **Revista Matéria**, p. 10-18, 2013.

62 SILVA, F.T et al, Análise do tamanho do cristalino de microdeformação da rede cristalina do carbeto de tungstênio moídos em moinho de alta energia. **19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 2010