

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**

**ENGENHARIA MECÂNICA**

**LUIZ HENRIQUE URBANO**

N. CLASS.	M671.35
CUTTER.	U929
ANO/EDIÇÃO.	2013.

**ANÁLISE DE USINAGEM DE DIAMANTAÇÃO PARA RODAS DE ALUMÍNIO  
UTILIZANDO O PROCESSO DE USINAGEM COM FLÚÍDO GASOSO ATRAVÉS  
DO EFEITO JOULE-THOMSON**

**Varginha  
2013**

**LUIZ HENRIQUE URBANO**

**ANÁLISE DE USINAGEM DE DIAMANTAÇÃO PARA RODAS DE ALUMÍNIO  
UTILIZANDO O PROCESSO DE USINAGEM COM FLUIDO GASOSO ATRAVÉS  
DO EFEITO JOULE-THOMSON**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica  
do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG  
como pré-requisito para a obtenção do grau de bacharel,  
sob a orientação do Prof. Esp. Valter Barbosa da Silva.

**Varginha  
2013**

**LUIZ HENRIQUE URBANO**

**ANÁLISE DE USINAGEM DE DIAMANTAÇÃO PARA RODAS DE ALUMÍNIO  
UTILIZANDO O PROCESSO DE USINAGEM COM FULÍDO GASOSO ATRAVÉS  
DO EFEITO JOULE-THOMSON**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de bacharel pela Banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em     /     /

---

Prof. Esp. Valter Barbosa da Silva

---

Prof. Me. Luiz Carlos Vieira Guedes

---

Prof. Esp. Luciene de Oliveira Prósperi

OBS.:

## RESUMO

Na usinagem de rodas de alumínio como no caso deste experimento pelo processo de usinagem de diamantação ou espelhamento de rodas, bem como em outros processos de usinagem, é gerada uma grande quantidade de calor devido ao atrito na interface peça-ferramenta. Este calor pode ser prejudicial aos resultados do processo, pois pode provocar redução da dureza da ferramenta e aumento do desgaste e redução da vida útil da mesma. Existem diversos métodos de refrigeração possíveis de serem empregados na usinagem. Os processos padronizados, que utilizam fluidos de corte, afetam os custos neste processo, além de causarem detrimento ao meio ambiente à saúde dos operadores. Neste contexto, a usinagem a seco apresenta-se como uma possível solução para os problemas citados, embora as exigências quanto à resistência e a dureza à quente das ferramentas sejam maiores. Neste experimento foi proposto o emprego de um sistema de refrigeração da ferramenta, pastilha ou inserto de diamante poli cristalino (PCD), e um porta-ferramentas que possibilita a circulação de ar comprimido no seu interior, oriundo da máquina com seis bar de pressão na sua entrada, este ar atravessa o porta-ferramenta na unidade e na sua saída onde o ar é expurgado a zero graus celsius resfriando a ferramenta de PCD por um efeito físico-químico conhecido como o Efeito de Joule-Thomson. Através desta pesquisa com o efeito Joule-Thomson mostrou-se a tentativa de minimizar os efeitos negativos de alto custo do consumo de óleo refrigerante, da variação da temperatura da ferramenta, vida útil da mesma, os indesejáveis problemas de contaminação dos fluidos refrigerantes, irritações cutâneas nos operadores bem como a preocupação com a preservação do meio ambiente.

**Palavras-chave:** Usinagem. Desgaste. Refrigeração. Temperatura.

### **ABSTRACT**

*In the machining of aluminum wheels as in the case of this experiment the machining process diamantação or mirroring wheels as well as in other machining processes, is generating a lot of heat due to friction at the interface-piece tool. This heat can be detrimental to the results of the process, which may cause reduction in hardness and an increase in tool wear thereof. There are several methods of cooling potential of being used in machining. Conventional methods that use cutting fluid, add cost to the process, besides causing damages to the environment and health problems to operators. In this context, dry machining is presented as a possible solution to the problems mentioned, although the demands for resistance and hot hardness of the tools are higher. This experiment has been proposed the use of a cooling system of the tool, chip or insert polycrystalline diamond (PCD) and one toolholder which allows the internal circulation of compressed air supplied at six-bar machine pressure at its input this air passes through the tool holder in the unit and its output where the air is purged at zero degrees celsius cooling the PCD tool by a physical-chemical effect known as the Joule-Thomson effect. Through this research with Joule-Thomson showed up to attempt to minimize the negative effects of the high cost of oil consumption coolant, the temperature variation of the tool service life, the undesirable problems of contamination of refrigerants, irritations operators in the skin as well as the preservation of the environment.*

**Keywords:** *Machining. Wear. Refrigeration. Temperature.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Zonas de geração de calor .....	17
Figura 02 – Parâmetros usados para medir os desgastes da ferramenta de corte .....	18
Figura 03 – Deformação plástica da aresta de corte .....	19
Figura 04 – Lascamento .....	20
Figura 05 – Trinca de origem térmica .....	21
Figura 06 – Trinca de origem mecânica .....	21
Figura 07 – Quebra de ferramenta .....	22
Figura 08 – Aresta postiça .....	22
Figura 09 – Desgaste frontal .....	24
Figura 10 – Desgaste de cratera .....	24
Figura 11 – Diagrama esquemático de uma operação de torneamento .....	25
Figura 12 – Irritação cutânea em operador causada por contaminação .....	36
Figura 13 – Roda sem diamantação e Roda com diamantação .....	39
Figura 14 – Usinagem de diamantação de rodas .....	40
Figura 15 – Módulo de elasticidade do aço e do alumínio .....	41
Figura 16 – Tipos de pastilhas para usinagem de alumínio .....	45
Figura 17 – James Prescott Joule e Willian Thomson .....	47
Figura 18 – Experiência de Joule .....	48
Figura 19 – Experiência de Thomson .....	50
Figura 20 – Porta Ferramenta sistema Cold-air .....	52
Figura 21 – Porta Ferramenta sistema Cold-air vista em corte .....	52
Figura 22 – Torno de usinagem de diamantação de rodas .....	56
Figura 23 – Dispositivo Cold-air adaptado para realização do teste .....	56
Figura 24 - Dispositivo Cold-air – realização do teste em bancada .....	57
Figura 25 – Especificação de pressão e temperatura na entrada do dispositivo .....	58

Figura 26 – Especificação de pressão e temperatura na entrada do dispositivo .....	58
Figura 27 – Temperaturas de escape lateral e saída frontal do dispositivo .....	59
Figura 28 – Temperaturas de escape lateral e saída frontal do dispositivo .....	59
Figura 29 – Pressão de saída do ar refrigerado (Cold-air) .....	60
Figura 30 – Pressão de saída do ar refrigerado (Cold-air) .....	60
Figura 31 – Torno de usinagem de diamantação de rodas – refrigeração óleo Sintético .....	61
Figura 32 – Roda diamantada no processo de refrigeração óleo sintético solúvel .....	61
Figura 33 – Sistema de Usinagem a ar refrigerado adaptado para o ensaio .....	62
Figura 34 – Ensaio de diamantação de rodas no processo de usinagem com ar refrigerado.	63
Figura 35 – Roda diamantada no processo de usinagem com ar refrigerado .....	63

## **LISTA DE TABELA**

Quadro 01 – Tabela de elementos de liga e a sua influência na usinabilidade .....	42
Quadro 02 – Tabela de formatos para utilização de pastilhas na usinagem de alumínio .....	43
Tabela 01 – Tabela raio de ponta para insertos de usinagem .....	43

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 ASPECTOS METALURGICOS DAS LIGAS DE ALUMINIO APLICADOS EM USINAGEM .....</b>	<b>13</b>
<b>3 FERRAMENTAS APLICADAS NA USINAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO .....</b>	<b>15</b>
<b>4 DESGASTE DE FERRAMENTA .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1 Mecanismos causadores do desgaste da ferramenta .....</b>	<b>19</b>
4.1.1 Deformação plástica da aresta de corte .....	19
4.1.2 Lascamento .....	20
4.1.3 Trincas .....	20
4.1.4 Quebra .....	21
4.1.5 Aresta postiça de corte .....	22
4.1.6 Abrasão mecânica .....	23
4.1.7 Oxidação .....	23
4.1.8 Batimento axial/radial .....	23
4.1.9 Vibração .....	23
4.1.10 Desgaste frontal .....	24
4.1.11 Desgaste de cratera .....	24
<b>5 REFRIGERAÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>5.1 Refrigeração com fluido de corte .....</b>	<b>27</b>
5.1.1 Fluidos de corte sólidos .....	28
5.1.2 Fluidos de corte líquidos solúveis em água .....	28
<b>5.2 Fluidos base mineral convencional (&gt;60% de óleo mineral) .....</b>	<b>29</b>
<b>5.3 Fluidos semi-sintéticos (20/50% de óleo mineral de alta performance) .....</b>	<b>29</b>
<b>5.4 Fluidos sintéticos verdadeiros (base polímero) .....</b>	<b>30</b>
<b>5.5 Fluidos sintéticos de base Éster ou vegetal .....</b>	<b>30</b>
<b>5.6 Refrigeração com fluidos gasosos .....</b>	<b>31</b>
<b>5.7 Refrigeração MQF (Mínima Quantidade de Fluido) .....</b>	<b>32</b>
<b>5.8 Refrigeração criogênica .....</b>	<b>32</b>
<b>5.9 Usinagem a seco .....</b>	<b>33</b>
<b>5.10 Efeitos nocivos causados por fluidos de corte refrigerantes à saúde ocupacional e ao meio ambiente .....</b>	<b>35</b>
5.10.1 Efeitos à saúde ocupacional .....	35
5.10.2 Efeitos nocivos ao meio ambiente .....	36
<b>6 USINAGEM DE RODAS DE ALUMÍNIO – DIAMANTAÇÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>6.1 A diamantação de rodas de alumínio .....</b>	<b>38</b>
<b>6.2 Itens de controle nas operações de usinagem .....</b>	<b>39</b>
<b>6.3 Processo de diamantação de rodas .....</b>	<b>40</b>
<b>6.4 Dispositivos de fixação .....</b>	<b>40</b>
<b>6.5 Ferramentas de corte utilizadas no setor de usinagem de alumínio .....</b>	<b>41</b>
6.5.1 As temperaturas de usinagem são geralmente baixas e altas velocidades de corte	

podem ser usadas .....	41
6.5.2 Ferramentas de metal duro utilizadas na usinagem do alumínio .....	42

<b>7 PROPOSTA DE UM PORTA FERRAMENTA A AR REFRIGERADO PARA OPERAÇÕES DE USINAGEM COM AR COMPRIMIDO NO PROCESSO DE DIAMANTAMENTO DE RODAS DE ALUMÍNIO ATRAVÉS DO EFEITO JOULE-THOMSON .....</b>	<b>46</b>
<b>7.1 Usinagem com ar comprimido refrigerado através do efeito Joule-Thomson .....</b>	<b>46</b>
7.1.1 Experiência do efeito Joule-Thomson .....	47

<b>8 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>53</b>
<b>8.1 Realização do ensaio no processo de usinagem de diamantação .....</b>	<b>53</b>
<b>8.2 Roteiro .....</b>	<b>56</b>
8.2.1 Realização do ensaio de bancada com o dispositivo Cold-air .....	57
8.2.2 Ensaio de usinagem de diamantação com óleo lubri-Refrigerante (atual) .....	60
8.2.3 Ensaio de usinagem de diamantação com refrigeração a fluido gasoso (ar Comprimido refrigerado) .....	62
8.2.4 Determinação experimental do coeficiente de Joule-Thomson para o ar .....	64

<b>9 CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
--------------------------	-----------

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>
--------------------------	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

Diversas ligas de alumínio foram desenvolvidas pelos setores automobilístico e aeronáutico e apresentam níveis elevados de resistência a corrosão e à tração, isto só foi possível devido a adição de determinados elementos de liga, melhores tratamentos térmicos e mecânicos. Com as mudanças ocorridas nos últimos tempos no setor de aeronaves e com o desenvolvimento de novos produtos na indústria automobilística como no caso da fabricação de rodas de alumínio, busca-se uma diversidade maior de novos materiais de alta qualidade e de dados embasados para sua manufatura e processo de fabricação.

Os materiais aeronáuticos sempre prezaram a sublimidade do alumínio e suas ligas, e atualmente estes são muito utilizados também na indústria automobilística devido a sua baixa massa específica aliada a propriedades mecânicas intermediárias que lhes confere elevada resistência mecânica no que tange a sua estrutura.

Para Diniz (2008), o processo de usinagem por torneamento, caracteriza-se na confecção de peças a partir da revolução de um material específico, na maioria com formato cilíndrico como no caso das rodas de alumínio, conjuntamente com uma ferramenta ou pastilha estacionária que remove material, cavacos através de suas arestas realizando movimento paralelo ao eixo principal de rotação da máquina. O atrito da peça com a ferramenta é o maior responsável pelo desgaste desta bem como o calor gerado durante o processo, já que a temperatura é o principal fator para conter a resistência mecânica da ferramenta.

Segundo os pesquisadores Stephenson, Jen e Lavine (1977), a ferramenta de corte é o dispositivo que está em contato direto com o material a ser trabalhado, possuindo uma geometria específica para cada tipo de operação em que é empregada para facilitar a remoção e a quebra do cavaco. No entanto, a dissipação do calor gerado durante a operação é um problema que vem sendo estudado há muito tempo, com isso, a sua concentração na zona de corte vem a danificar a ferramenta, e isso acaba reduzindo as suas qualidades mecânicas e de resistência ao desgaste. Há casos em que elementos constituintes da ferramenta acabam difundindo-se quimicamente com o cavaco, com a peça e o fluido de corte.

O aumento da temperatura ocorre conforme o calor específico e a condutibilidade térmica do material em contato além das dimensões e seções por onde escoar o calor, pois é este calor na área de atrito direto entre a ferramenta e a peça como também o deslizamento do cavaco na face desta que acabam diminuindo a sua vida útil e com o aumento da temperatura,

ocorre principalmente deformação plástica, com isso podemos então concluir que a temperatura é maior em áreas com deformação mais rigorosa.

Nouari (2003), relata que as altas temperaturas nos processos de usinagem foram sempre um fator preocupante para as ferramentas de corte, pois além de aumentar os mecanismos de desgaste prematuro, o aumento da temperatura também reduz o seu limite de escoamento, o que torna esta temperatura o fator de controle da taxa de remoção.

Entretanto essas altas temperaturas podem também ser atingidas quando se usinam o alumínio, principalmente em ligas mais resistentes, como as ligas fundidas da classe de Al-Si-Cu-Mg da linha automotiva e as ligas trabalháveis da classe de Al-Zn da linha aeronáutica. O valor da temperatura é o ponto mais importante na busca do uso de ferramentas permitindo, controlar os fatores que influenciam na vida e no desgaste das mesmas. A temperatura também influencia no controle dimensional e no acabamento superficial da peça colaborando assim para reduzir as forças e a potência de usinagem (MACHADO et al, 2009).

O desgaste precoce da ferramenta prejudica o processo de usinagem, pois, além da necessidade de substituição da ferramenta ocorre desperdício no que tange ao tempo com a parada na produção, existem custos envolvidos para tal manutenção, o seu desgaste influencia no acabamento final da peça produzida que também se reflete em prejuízo para empresa devido à existência de peças de refugo ou que necessitem de retrabalho.

A temperatura é o principal fator quando trabalhamos com regimes elevados e com altas velocidades de corte e avanço bem como a profundidade de corte da ferramenta, existem diversos estudos relacionados com padrões e métodos de usinagem para minimizar este problema, um dos problemas de difícil solução que se percebeu é o aparecimento de aresta postiça que posteriormente irá gerar trincas térmicas na aresta principal de corte, devido principalmente à variação brusca de temperatura sofrida pela ferramenta quando se utiliza o fluido externo como método de refrigeração, estes métodos procuram amenizar o desgaste durante a usinagem, como a utilização de fluidos de corte que apesar de ser bastante comuns eles prejudicam o meio ambiente, a saúde do operador e tem um alto custo para descarte.

A usinagem criogênica está apresentando bons resultados onde se utiliza nitrogênio líquido como lubri-refrigerante, diminuindo o efeito da temperatura e sem danos ao meio ambiente, há também outros métodos alternativos como a utilização de ar comprimido e ar comprimido refrigerado, mínima quantidade de lubrificante (MQL), resfriamento por gelo seco e até mesmo a usinagem a seco, esta última, sem nenhum tipo de fluido refrigerante.

O objetivo deste estudo é adaptar um porta ferramenta refrigerado internamente através da entrada de ar comprimido na parte posterior deste dispositivo onde este ar comprimido sofre uma mudança brusca na sua temperatura devido a um fenômeno físico químico conhecido como efeito de Joule-Thomson para minimizar o custo com a utilização de óleo refrigerante e o desgaste causado na ferramenta (usinagem a fluido gasoso), devido às condições citadas anteriormente, sem a utilização de óleos refrigerantes para o processo de usinagem de espelhamento ou diamantação de rodas, verificando assim, o prolongamento de vida útil da mesma, procurando também minimizar, como já dito, os custos, a saúde do colaborador no que tange a dermatites causadas por alergia devido à contaminação pelo uso destes lubri-refrigerantes como também a preservação do meio ambiente.

## 2 ASPECTOS METALÚRGICOS DAS LIGAS DE ALUMÍNIO APLICADAS EM USINAGEM

Dentre os metais mais pretendidos nos processos de usinagem, o alumínio e suas ligas merecem um destaque diferenciado quando comparadas com processos envolvendo as ligas de outros metais. Constatou-se muitas vantagens neste tipo de usinagem, como alta qualidade no acabamento superficial das peças usinadas, baixas forças e temperaturas de corte, velocidades de corte elevadas, controle dimensional com boa aceitação, bem como a maior durabilidade da ferramenta. Na maioria das ligas de alumínio usinadas a frio nota-se muito pouco desgaste da ferramenta quando comparado com outros desgastes como no caso das ferramentas utilizadas para a usinagem de aços e outros metais ferrosos (NOUARI, 2003).

A usinabilidade do alumínio e suas ligas podem ser prejudicadas através de variações em suas propriedades mecânicas, como: presença de elementos de liga, impurezas, óxidos, processos de obtenção da liga e tratamentos térmicos - solubilização e envelhecimento.

A concentração de elementos de liga no alumínio produz modificações na sua microestrutura refletindo negativamente na usinabilidade. Um exemplo é o endurecimento causado por solução sólida (notável nas ligas Al-Cu, por exemplo) ou por precipitação (nas ligas Al-Mg-Si e Al-Mg-Zn), os quais têm efeito benéfico sobre a usinabilidade do material, porque fragilizam os cavacos e permitem o uso de ferramentas com ângulos de cunha maiores, mais robustas e duráveis, como por exemplo os insertos de PCD.

Weingaertner (1990), afirma que é possível conseguir também melhorias na usinagem de ligas de alumínio através da adição de elementos insolúveis no alumínio, onde estes possuem baixo ponto de fusão, como no caso do bismuto, estanho, chumbo, antimônio e cádmio. Esses elementos são arrastados na forma de pequenos glóbulos uniformemente distribuídos pela matriz e atuam como descontinuidades dentro do metal de base. Quando sujeitos às temperaturas de corte e ao entrarem em contato com a ferramenta, eles se fundem causando lubrificação na ferramenta.

Nos processos de obtenção das ligas de alumínio uma distinção deve ser feita entre as ligas trabalháveis a frio e ligas fundidas. Algumas ligas obtidas por fundição apresentam teores de silício que podem atingir cerca de 12% ou mais, no caso das rodas de alumínio os teores de silício variam na faixa de 7% e 11% e têm caráter abrasivo impondo um desgaste maior nas ferramentas de corte.

As ligas de alumínio-silício (AlSi) obtidas por fundição, são mais difíceis de serem usinadas do que ligas alumínio-cobre ou alumínio-magnésio e geralmente são usinadas utilizando-se altas rotações e velocidades de corte, ferramentas de metal duro (classe K ou PCD), conjuntamente com a inserção de fluidos de corte refrigerantes e lubrificantes.

Também as ferramentas de diamante poli cristalino (PCD) estão sendo utilizadas com sucesso para o aumento da vida útil na usinagem de ligas da família alumínio-silício.

As ligas de rodas não tratáveis (AlSi-11%) termicamente e as tratáveis (AlSi-7%) nos processos de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, (espécie de têmpera e revenimento no caso do aço, ocorre porém para o tratamento do alumínio), tendem a formar cavacos contínuos em forma de fita durante a usinagem, apresentando acabamento superficial ruim e uma tendência grande ao empastamento da ferramenta (aresta postiça), mesmo com velocidades altas de corte, por isso se desenvolveram ferramentas ou pastilhas de metal duro com formatos a ângulos de saída apropriados para a quebra do cavaco.

### 3 FERRAMENTAS APLICADAS NA USINAGEM DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Na usinagem de ligas de alumínio a análise do comportamento do material utilizado é muito importante durante a sua confecção, analisando cautelosamente as situações de usinagem, tais como demanda de produção, tipo de operação, máquina-ferramenta, qualidade no acabamento final, tolerâncias dimensionais exigidas, entre outras. Também o baixo módulo de elasticidade e o baixo ponto de fusão do alumínio, sua alta ductilidade e a tendência a formar aresta postiça são características que devem ser levadas em conta quando se analisa a geometria de uma ferramenta para a usinagem de ligas de alumínio.

Várias das dificuldades no decorrer da usinagem de ligas de alumínio podem ser vencidas utilizando-se altas velocidades de corte e afiação aguda do gume de corte da ferramenta, empregando-se velocidades de corte na faixa de 2000 a 3000 m/min na busca para se obter um bom acabamento e também a utilização de ferramentas de metais duros da classe K ou pastilhas de PCD, as quais possuem uma resistência mecânica relativamente alta. Já ferramentas constituídas de carbonetos de titânio não são adequadas para a usinagem de alumínio devido a grande afinidade química entre o Al e o Ti (WEINGAERTNER, 1990).

Para melhor compreensão dos parâmetros de usinagem das ligas de alumínio é necessário controlar a geração de calor que ativa a difusão entre a ferramenta e o cavaco facilitando a sua remoção na região de corte. É importante frisar que o calor gerado também provém da geometria da ferramenta, da conjuntura do corte e do atrito entre a ferramenta e a peça na retirada do cavaco, onde este último depende das condições de corte, da temperatura e da característica do contato entre as superfícies da peça e da ferramenta em questão.

Outro ponto importante nas ferramentas ou pastilhas de usinagem é o seu ângulo de corte, bem como o seu raio ponta, fatores que atuam conjuntamente com as altas rotações e velocidades de corte.

#### 4 DESGASTE DE FERRAMENTA

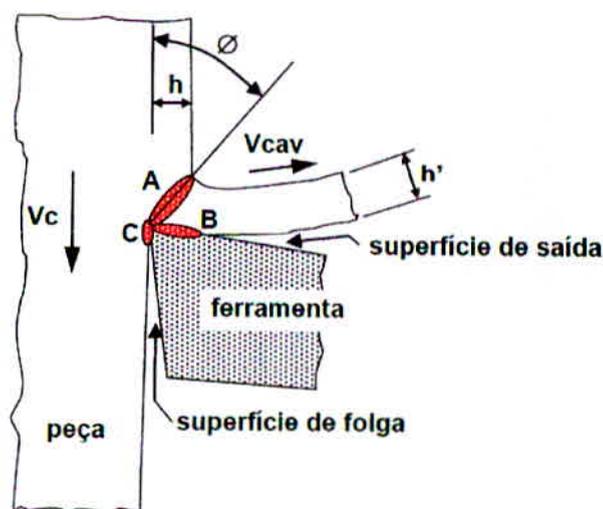
No final dos anos 70 e início dos anos 80, os revestimentos para ferramentas de corte aplicados na indústria destinaram-se aos setores de fundição e injeção de alumínio e de conformação. A matéria prima principal nesta época como revestimento para proteção contra os desgastes foram películas constituídas através do processo de nitretação, tais como TiAlN, TiN, TiCN, entre outros. Contudo, a busca pelo melhor desempenho de ferramentas de corte alavancou uma diversidade de estudos e pesquisas na área de desenvolvimento de novos produtos, processos e revestimentos compostos de novos materiais, que suportassem a situações de operações de usinagem cada vez mais adversas.

O processo de usinagem de ligas de alumínio merece uma atenção diferenciada, pois é a operação utilizada para produção de diversas peças usinadas na indústria na atualidade. Na usinagem de ligas de alumínio outro principal inconveniente além da temperatura é a formação de aresta postiça na ferramenta. Os prejuízos causados pela perda de pastilhas ou insertos de usinagem devido a formação da aresta postiça e posteriormente a geração de outros mecanismos de desgaste oriundos deste primeiro é o aumento da força de usinagem e da temperatura de corte interferindo na redução da qualidade do acabamento superficial da peça usinada até o lascamento ou quebra da ferramenta, não podendo esquecer no que tange a qualidade no acabamento, o fluido de corte está diretamente ligado a este fator.

Diniz (2008), nos mostra que para compreendermos melhor o desgaste que ocorre na ferramenta é necessário entendermos primeiramente algumas características relacionadas à constituição do cavaco, pois ele permanece em contato com a ferramenta durante todo o ciclo de corte na usinagem e é nele que se concentra e se dissipa a maior temperatura durante a usinagem, uma dissipação na zona de atrito onde a peça sofre dilatação térmica prejudicando as tolerâncias dimensionais exigidas, correções com relação a esta perda nas tolerâncias estão sendo diminuídas com pesquisas realizadas na utilização de fluidos refrigerantes mais adequados na busca de conter este agravante.

O processo de formação de cavaco pode ser sintetizado em quatro etapas: na primeira, ocorre uma deformação elástica onde o material se desloca no sentido do ângulo de cunha ou superfície de folga, posteriormente ocorre deformação plástica onde o limite de escoamento é vencido, depois o material se rompe por cisalhamento e finalmente o cavaco desliza sobre a superfície de saída ou ângulo de saída da ferramenta finalizando o processo.

Figura 01: Zonas de geração de calor: (A) zona de cisalhamento primário; (B) zona de cisalhamento secundário e (C) zona de atrito peça-ferramenta



Fonte: (FERRARESI, 1977).

Este esforço é de suma importância para que as indústrias continuem otimizando seu processo produtivo e quanto maior a sua produção maior a sua demanda de adequar velocidades de corte ainda maiores ao processo e conseqüentemente acarretando no aumento do desgaste por consequência das altas temperaturas através do atrito e das forças de corte.

Com a ocorrência de vários desgastes nas ferramentas foram fixados alguns padrões para o controle desses desgastes para a determinação da vida útil dessas ferramentas ou pastilhas de usinagem utilizadas.

Ferraresi (1977), chama de vida útil da ferramenta o tempo que esta trabalha efetivamente até a sua escassez de corte deteriorando-se, a capacidade de sua perda de corte é avaliada quase sempre na faixa de determinado grau de desgaste. Dentre os principais desgastes destacam-se as trincas causadas pela variação brusca da temperatura e dos esforços mecânicos.

Verificamos que as trincas ocorrem perpendicularmente à aresta de corte, as principais justificativas para este tipo de ocorrência é o corte interrompido e o acesso irregular do fluido de corte na ferramenta, pois nesta a região (zona de corte), a temperatura é mais alta devido ao contato com o cavaco e a peça simultaneamente, já nas regiões periféricas à zona de corte a temperatura é bem menor, acarretando na dilatação da ferramenta na sua deformação também causando as trincas térmicas. Contudo não é este tipo de desgaste o principal fator conclusivo para o fim de vida da ferramenta perante a dificuldade de se avaliar estas trincas sem o auxílio da varredura eletrônica microscópica. Com isso, utilizaram outros tipos de desgaste como critério para a determinação da vida útil da ferramenta, baseados em estudos científicos e na

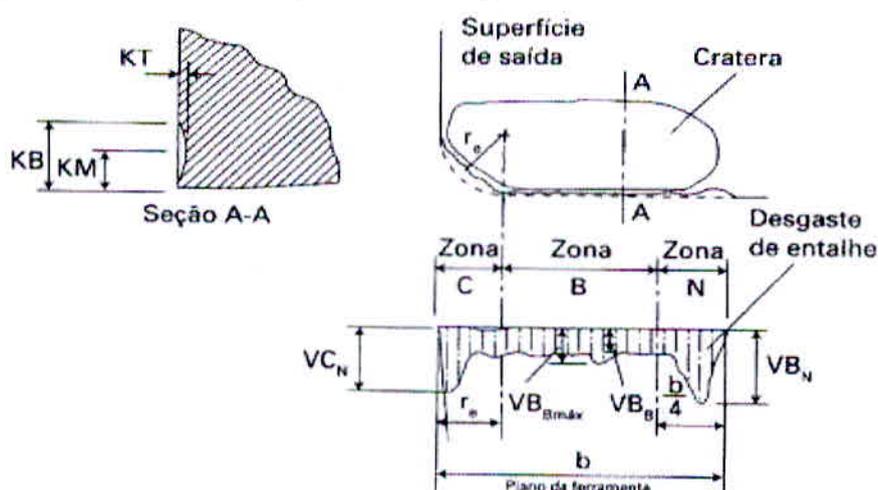
norma ISO-3685/93, que definem como avaliar, dimensionar e classificar o desgaste progressivo através dos parâmetros de usinagem estabelecidos.

Dentre os mais conhecidos tipos de desgastes em que uma ferramenta está submetida, os desgastes de cratera e de flanco foram utilizados como referencial para determinar o fim de vida da mesma.

A definição de desgaste de flanco é o desgaste ocorrido na região da superfície de folga da ferramenta ocorrido devido ao atrito entre ferramenta e a peça, e ainda pode ocasionar o desgaste por entalhe na região das extremidades do desgaste de flanco e que são responsáveis pela má qualidade do acabamento superficial da peça alterando o formato da aresta de corte original, este tipo de desgaste ocorre devido a intensidade da velocidade de corte. Já o desgaste por cratera ocorre no ângulo de saída da ferramenta ocasionado pelo atrito entre o cavaco e a ferramenta o seu agravamento ocasiona a quebra da ferramenta assim que ele se encontra com o desgaste de flanco. No instante em que o desgaste de flanco máximo na zona B de sua da aresta principal de corte ( $VB_B \text{ máx}$ ), atingir 0,3 mm a ferramenta terá alcançado o final da sua capacidade de trabalho (MOOK; SHAHABI; RATNAM, 2009).

Caso ocorra o desgaste de cratera na face da ferramenta e este atingir uma profundidade igual ou maior a especificada (0,3 mm, por exemplo) que tange ao avanço utilizado, será este o critério de vida útil da ferramenta adotado, conforme reza a norma ISO3685/93, como mostrado na figura 2.

Figura 02: Parâmetros usados para medir os desgastes da ferramenta de corte.



Fonte: (MACHADO et al, 2009).

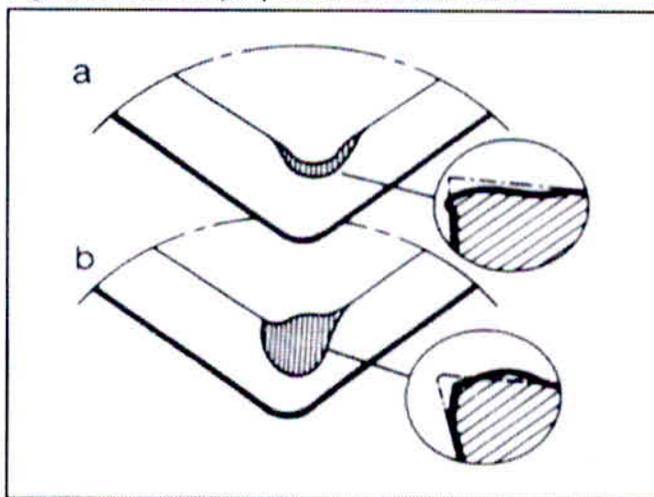
## 4.1 Mecanismos Causadores do Desgaste da Ferramenta

Ocorrem diversos tipos de desgastes e avarias em uma ferramenta de usinagem, bem como nas pastilhas de metal duro dos quais destacamos entre eles os principais:

### 4.1.1 Deformação plástica da aresta de corte

É um tipo de avaria da ferramenta (Figura 3). A carga aplicada sobre a aresta de corte da ferramenta conjuntamente com a alta temperatura originam uma deformação plástica na aresta de corte. Estas deformações provocam deficiências do controle de cavacos e deterioração do acabamento superficial da peça. Para evitar a deformação plástica é necessária uma ferramenta com maior dureza e maior resistência à deformação, ou pela mudança das condições de usinagem e/ou geometria da ferramenta, buscando uma diminuição da temperatura de corte.

Figura 03: Deformação plástica da aresta de corte

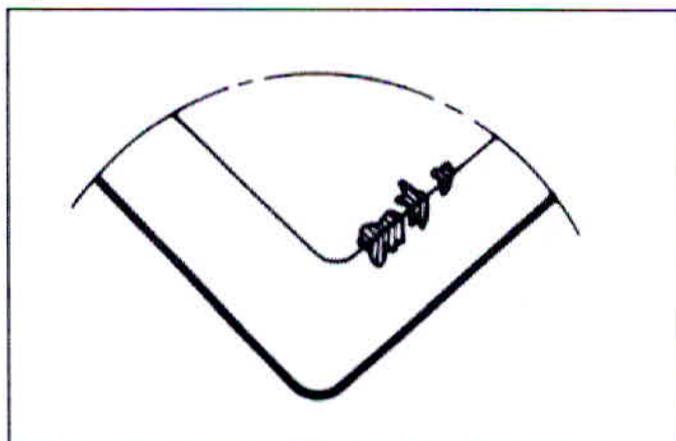


Fonte: (MACHADO et al, 2009).

#### 4.1.2 Lascamento

É um tipo de avaria da ferramenta (Figura 4). Ocorre quando são retirados de uma só vez partículas maiores, este tipo de avaria é comum em ferramentas com material frágil ou quando a aresta é pouco reforçada. Prejudicam a qualidade do acabamento superficial da peça.

Figura 04: Lascamento



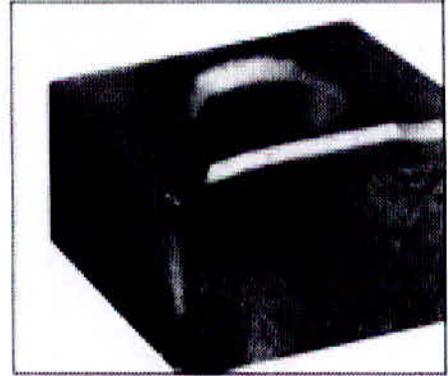
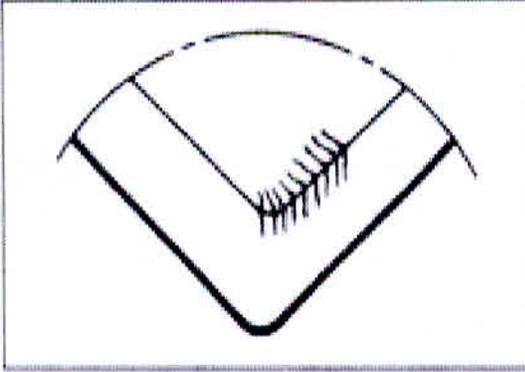
Fonte: (MACHADO et al, 2009).

#### 4.1.3 Trincas

São causadas pela variação da temperatura ou pela variação dos esforços mecânicos. Quando as trincas possuem origem térmica elas ocorrem quase sempre no sentido perpendicular à aresta de corte e quando são de origem mecânica são paralelas à aresta de corte, conforme figura 5.

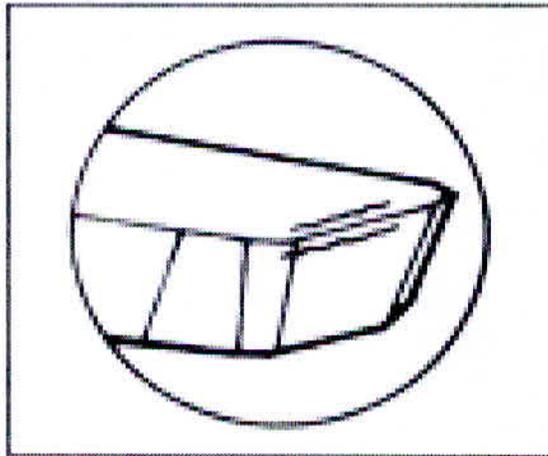
Os problemas geradores da variação de temperatura ou de esforços mecânicos na usinagem são: corte interrompido, acesso irregular do fluido de corte e variação de espessura de corte. Para evitar a formação das trincas pode-se, escolher uma ferramenta mais resistente, diminuir o avanço, posicionar corretamente a ferramenta em relação à peça, bem como o direcionamento do óleo refrigerante, conforme figura 6.

Figura 05: Trinca de origem térmica.



Fonte: (MACHADO et al, 2009).

Figura 06: Trinca de origem mecânica.

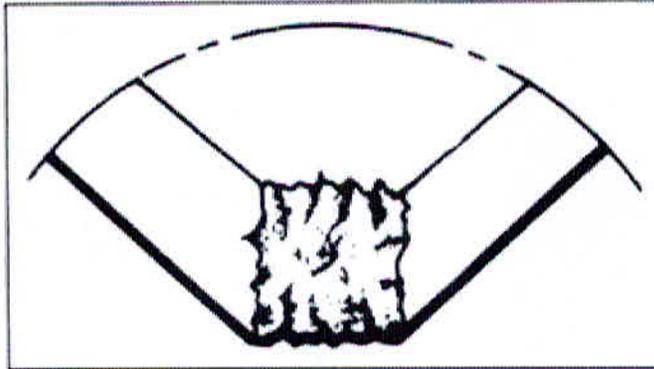


Fonte: (MACHADO et al, 2009).

#### 4.1.4 Quebra

Todos os desgastes e avarias da ferramenta ao progredirem podem ocasionar a quebra. Em alguns casos a quebra pode ocorrer de repente devido a alguns fatores: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta e ângulo de cunha pequenos, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos bolsões de cavacos, etc (Figura 7). A quebra não ocasiona problemas somente na pastilha, mas também no porta-ferramentas e na máquina.

Figura 07: Quebra de ferramenta.

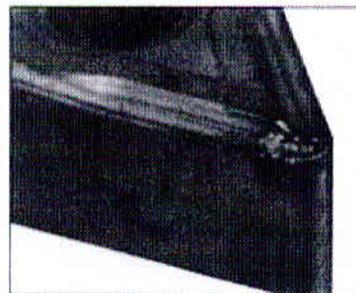
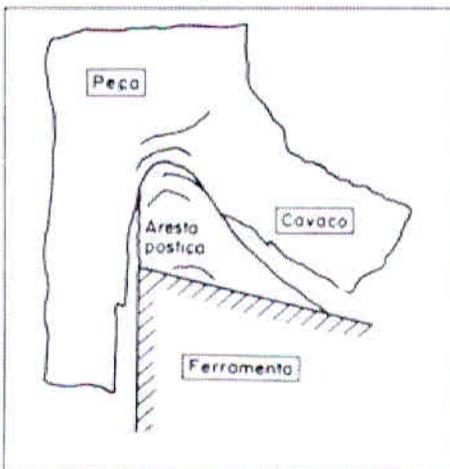


Fonte: (MACHADO et al, 2009).

#### 4.1.5 Aresta postiça de corte

Muitas vezes na usinagem pode-se formar na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta ou inserto uma camada de cavaco que, permanecendo aderente à aresta de corte, altera seu comportamento com relação à força de corte, acabamento superficial da peça e desgaste da ferramenta. Conforme a velocidade de corte aumenta, consequentemente a temperatura de corte também aumenta e quando a temperatura de recristalização do material do cavaco é ultrapassada, neste instante, não há mais formação da aresta postiça. Todas as variações que podem ser feitas no processo e que aumentam a temperatura de corte, tais como aumento de avanço e da profundidade de corte, diminuição dos ângulos de saída e de inclinação, retirada da refrigeração, etc, tendem a diminuir a possibilidade de formação da aresta postiça.

Figura 08: Aresta postiça.



Fonte: (MACHADO et al, 2009).

#### 4.1.6 Abrasão Mecânica

A abrasão mecânica causada pelo atrito é uma das principais causas de desgaste da ferramenta. O desgaste gerado pela abrasão é causado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta.

#### 4.1.7 Oxidação

Altas temperaturas e a presença de ar e água (contida nos fluidos de corte) geram oxidação para a maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto durante o corte formam filmes de óxidos sobre a ferramenta, que são facilmente levados embora pelo atrito, gerando desgaste. O desgaste gerado pela oxidação se forma nas extremidades do contato entre o cavaco e a ferramenta devido ao acesso do ar nesta região.

#### 4.1.8 Batimento axial/radial

Quebra da aresta, vibração e desgaste excessivo. A solução consiste em montar adequadamente a pastilha durante o aperto do parafuso no porta-ferramenta, utilizando se possível o auxílio de um pré-set.

#### 4.1.9 Vibração

É a ocorrência mais comum em fresamento, devido a pastilha entrar e sair do material durante a usinagem, causando variações bruscas de forças de corte ou impacto. Quando o número de impactos (são o número de pastilhas multiplicadas pela rotação) está muito próximo ou igual à frequência natural da ferramenta, ocorre ressonância, gerando a vibração da máquina devido ao impacto da peça ou qualquer outro componente.

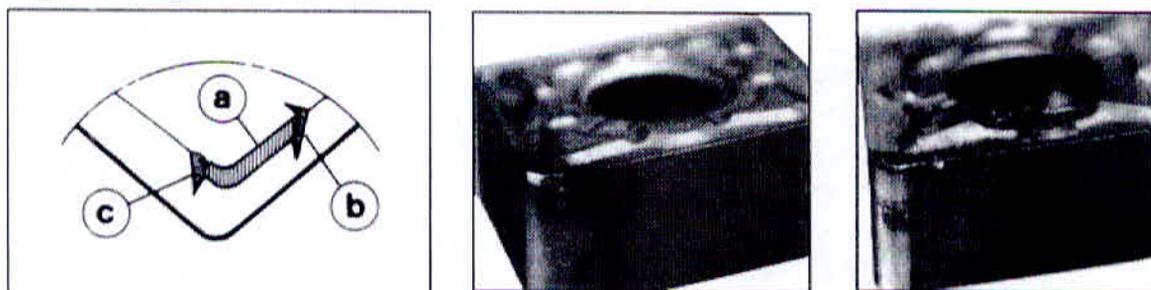
A solução para fresas de topo longa consiste em utilizar pastilha com preparação especial na aresta, aumentar/diminuir a velocidade de corte em 50% ou aumentar o avanço em 50%. Para as fresas de alto rendimento é aconselhável utilizar pastilhas com preparação especial na aresta, aumentar/diminuir a velocidade de corte em 50%, aumentar o avanço em 50% e transformar, se possível, em meio corte efetivo. Para as fresas de corte de facear

podemos utilizar cabeçote com o menor diâmetro possível, utilizar pastilha com quebra cavaco serrilhado e reduzir profundidade de corte.

#### 4.1.10 Desgaste frontal

Também conhecido como de desgaste de flanco. Ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça é o tipo mais comum.

Figura 09: Desgaste frontal.

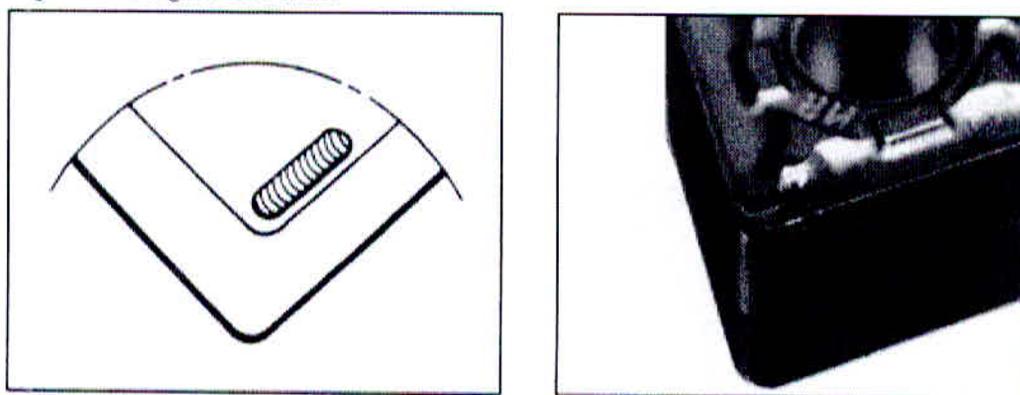


Fonte: (MACHADO et al, 2009).

#### 4.1.11 Desgaste de cratera

É o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre cavaco e ferramenta. Em alguns processos pode não ocorrer, principalmente quando se utilizar de ferramentas de metal duro recobertas. A sua progressão gera a quebra da ferramenta, quando encontrar com o desgaste frontal.

Figura 10: Desgaste de Cratera



Fonte: (MACHADO et al, 2009).

Os desgastes de flanco e cratera aumentam progressivamente até que chega ao extremo da ferramenta sofrer fratura no gume cortante devido ao aumento do desgaste de cratera, o desgaste de flanco geralmente é bem maior principalmente quando a ferramenta

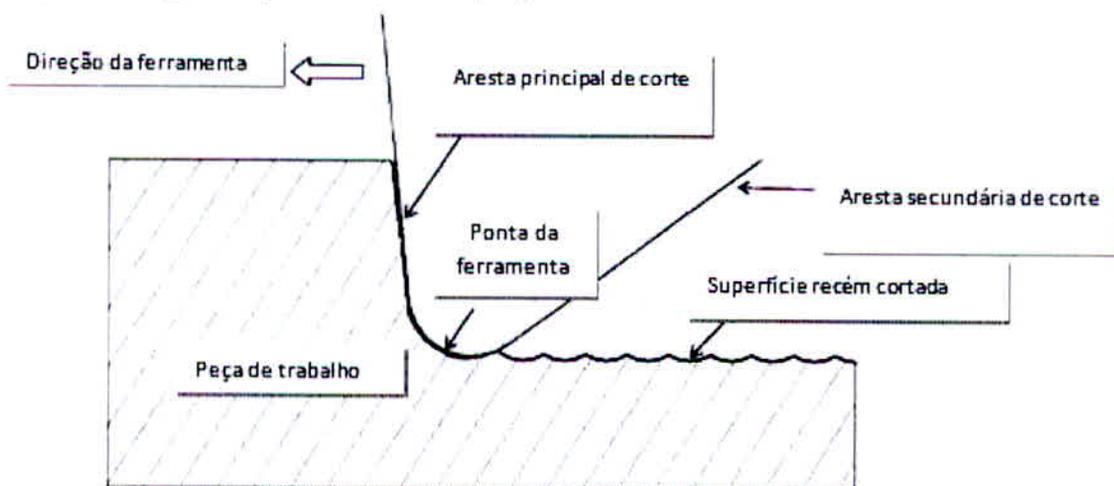
possui um ângulo de ponta pequeno. De acordo com Ferraresi (1977) a ferramenta deve ser retirada da máquina assim que os desgastes citados sejam suficientes para causar a quebra da ferramenta.

Apesar de analisarmos o desgaste de flanco e de cratera da ferramenta de corte para determinar a sua vida útil, eles não influenciam na rugosidade da peça usinada no caso específico quando se trabalha com corte interrompido.

Os resultados demonstraram que apesar do desgaste de flanco aumentar com avariação do avanço e da velocidade de corte, a rugosidade superficial diminui correspondente à variação da velocidade de avanço, pois o desgaste da ferramenta que é responsável pela deterioração da superfície da peça usinada é o desgaste de entalhe.

A parte da ferramenta que está em contato direto com a superfície da peça é a ponta da ferramenta, ou seja, a rugosidade depende do raio de ponta principalmente em uma operação de acabamento, uma vez que a aresta principal de corte remove material sem deixar marcada a peça, como é possível observar na figura 11.

Figura 11: Diagrama esquemático de uma operação de torneamento



Fonte: (MOOK; SHAHABI; RATNAM, 2009).

Portanto, o desgaste de flanco e cratera apenas definem que a ferramenta não poderá mais ser usada, já que a rugosidade da peça usinada não depende deles e sim da geometria da ponta da ferramenta ou do raio de ponta. Os mecanismos de desgaste atuam simultaneamente com supremacia de um ou outro, os mais comuns são: adesão, abrasão, difusão, oxidação, etc. A identificação desses mecanismos não é nada simples e a maioria das interpretações está sujeita a controvérsias. Nos dias de hoje, sabemos que não é difícil diminuir estes efeitos para aumentar a vida útil das ferramentas de corte, utilizando-se para isso os fluidos de

refrigeração que são os fluídos de corte com diversas emulsões na sua composição que colaboram muito para o resfriamento como também contribuem para melhor acabamento superficial proporcionando a qualidade do produto a ser confeccionado.

O torneamento é um processo de usinagem bastante agressivo que causa muitos danos aos componentes de um modo geral como foi observado anteriormente, porém existem várias alternativas para minimizar tais efeitos conhecidos como métodos de refrigeração e lubrificação.

Em seguida serão abordados quais e como são utilizados estes métodos.

## 5 REFRIGERAÇÃO

Os fluidos de corte são imprescindíveis na usinagem para resfriar a peça e lubrificá-la (melhor acabamento) e a ferramenta (menor desgaste), lubrificar o contato e proteger contra oxidação, bem como remover o cavaco para evitar aresta postiça.

Para a refrigeração da zona de corte existem diversas possibilidades e podemos desmembrá-las em três tipos e de acordo com as suas características principais:

a) **Fluidos sólidos** (principal função: lubrificação):

- Grafite;
- Bissulfeto de molibdênio;

b) **Fluidos líquidos** (atingem todas as funções desejadas):

- Óleos de corte integrais (não são misturados com água);
- Óleos emulsionáveis ou “solúveis” (são combinados com água);
- Fluidos químicos ou sintéticos (combinação de água com aminas, nitritos, fosfatos, boratos;

A escolha entre os vários tipos de fluidos de corte depende do tipo de operação, do material a ser processado e do material da ferramenta.

O fluido de corte líquido pode ser coletado, filtrado e reutilizado.

c) **Fluidos gasosos** (principalmente resfriamento, também colaboram com a limpeza ou mesmo proteção contra oxidação):

- Ar comprimido
- CO<sub>2</sub>
- Nitrogênio.

### 5.1 Refrigeração com fluido de corte

O fluido de corte é o meio mais utilizado atualmente e foi introduzido em 1980 por F. W. Taylor, que utilizou água para resfriar a ferramenta, esta é uma dentre as inúmeras funções que o fluido de corte possui, como: expulsão do cavaco da região de corte, contribuindo com a quebra e a saída do cavaco evitando que ele entre em contato com a peça podendo danificar a superfície usinada; lubrificação, diminuindo o coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça, ferramenta e cavaco; proteção contra corrosão; refrigeração, pois possui alto calor específico e alta condutibilidade térmica (DINIZ, 2008).

Ferraresi (1977), relata as vantagens econômicas do fluido de corte além das características funcionais que foram colocadas anteriormente por Diniz. As características econômicas são as que tornam o processo mais econômico com redução do consumo de energia de corte; redução do custo da ferramenta na operação; impedimento da corrosão da peça em usinagem. Contudo as principais funções do fluido de corte são a retirada do calor e a lubrificação na região de corte.

Childs, Maekawa e Maulik (1988), afirmam que a penetração do fluido na interface peça-ferramenta ocorre de maneira não satisfatória devido às altas pressões que estes componentes são submetidos, portanto o que ocorre é um resfriamento indireto com o fluido de corte retirando calor da superfície do cavaco, da peça e da ferramenta que estão em contato com o fluido.

No entanto, causam problemas no ambiente de trabalho e ao meio ambiente devido a complexidade do descarte que pode trazer problemas de contaminação, desrespeito à legislação ambiental e de segurança no trabalho. Neste contexto, procuram-se novas alternativas para atender a crescente demanda da indústria metal-mecânica.

### 5.1.1 Fluidos de corte sólidos

Os fluidos de corte sólidos como o grafite em pó e o bissulfeto de molibdênio são fluidos pouco utilizados, pois sua função se restringe apenas na lubrificação da peça na zona de corte, comprometendo assim o resfriamento da ferramenta onde acarretará um maior desgaste desta e também o surgimento de aresta postiça.

A pasta de Bissulfeto de Molibdênio ( $MoS_2$ ) pode ser aplicada na superfície de saída da ferramenta com um pincel. Pelas suas características lubrificantes em condições de extrema pressão, tem apresentado excelentes resultados.

### 5.1.2 Fluidos de corte líquidos solúveis em água

São muitas as exigências que se fazem aos fluidos de corte, tanto referentes a presenças positivas quanto àquelas que devem ser evitadas a todo custo e devemos ter ambas bem presentes.

- **O que queremos dos fluidos de corte:** proteção da máquina contra a corrosão; fácil preparação e excelente desempenho na usinagem; compatibilidade com a maioria das pinturas e vedações, respeito ao meio ambiente e inofensivo ao operador; compatibilidade com metais

ferrosos e não ferrosos, prolongamento da vida útil da ferramenta; baixa formação de espuma, mesmo sob alta pressão do fluido, alta tratabilidade para descarte, baixo volume de resíduos provenientes do descarte, bom poder de filtração do fluido em uso, emulsões resistentes biologicamente aos contaminantes de processo (hidráulico e barramento).

- **O que não queremos do fluido de corte:** degradação biológica; emulsões difíceis de preparar; corrosão das partes móveis e fixas das máquinas ou nas peças usinadas; dermatites causadas por infecção de bactérias ou biocidas inadequados; formação de espuma incontrolável; mau acabamento e corrosão das peças usinadas; ataque à pintura e às vedações e mangueiras da máquina.

A classificação abaixo visa tornar mais fácil o entendimento dos tipos de tecnologia disponíveis, que serão tratadas em detalhe no futuro. Adiantamos que tal classificação pode sofrer pequenas alterações conceituais entre diferentes empresas fabricantes de óleo ou mesmo dependendo da cultura de cada país (CASTROL BRASIL, 2003).

## **5.2 Fluidos base mineral convencional (>60% de óleo mineral)**

São os de tecnologia mais antiga. Formam emulsões leitosas de bom poder lubrificante, mas são muito susceptíveis à deterioração biológica. Estes fluidos devem ser utilizados depois de uma boa limpeza na máquina, correta reposição e controle diário da emulsão, pois tendem a se deteriorar mais facilmente quando contaminados. O emprego de acoplantes e emulgadores fenólicos para prolongar a vida útil desse tipo de fluido deve ser coibido, pois pode causar dermatite e risco à saúde dos operadores. A qualidade do óleo mineral empregado também é importante, devendo ser usados óleos de base parafínica e com baixo nível de carbonos aromáticos, também por motivos de saúde.

## **5.3 Fluidos semi-sintéticos (20/50% de óleo mineral de alta performance)**

Foram desenvolvidos para uma vida útil mais longa, em locais onde a limpeza da máquina, reposição e controle diário da emulsão não são tão eficientes. O emprego de uma menor quantidade de óleo mineral, parcialmente repostada por uma base sintética, promove melhor desempenho na usinagem. O emprego de aditivos borados e biocidas especiais garante maior estabilidade biológica. Podem apresentar aspecto de emulsão leitosa ou transparente de acordo com a taxa de óleo mineral/emulsificante empregada. São adequados para a maioria

das operações de usinagem, garantindo alta performance e melhor acabamento superficial, principalmente em nossos tipos de máquinas CNC.

Embora os aditivos borados ainda sejam muito empregados nos USA e na Inglaterra, outros países, como a Alemanha, são contrários ao seu emprego. Os riscos referentes ao uso do boro na dosagem adotada nos fluidos de corte ainda são discutidos, embora exista, no Brasil, uma tendência à redução deste componente.

Nossa legislação ambiental possui limites para despejo do boro após descarte.

#### **5.4 Fluidos sintéticos verdadeiros (base polímero)**

Ao contrário dos tipos anteriores, estes fluidos não formam emulsões e sim soluções químicas verdadeiras, sendo, por isso, chamados de "sintéticos verdadeiros" (True Synthetic Fluid). Sua principal vantagem é a capacidade de não absorver os óleos contaminantes que vazam das máquinas (hidráulicos e barramentos) e possuir excepcional resistência biológica.

Suas propriedades lubrificantes são determinadas pelo tipo de polímero solúvel em água empregado na formulação, fator diferencial na qualidade dos fluidos sintéticos de diferentes fabricantes.

O uso desses fluidos deve levar em conta sua elevada vida útil, excelente grau de limpeza das peças e máquinas, redução de trocas, volumes de descarte tendendo a zero, resistência a contaminações de lubrificantes e outros dejetos, facilidade de controle e baixos níveis de reposição gerando baixos consumos.

Entretanto, a concentração (analisada por refratômetro) do produto deve ser controlada diária e eficientemente, dentro dos padrões recomendados pelo fornecedor, para evitar corrosão.

Neste caso, recomendam-se testes freqüentes de corrosão (DIN 51360/2) nos locais onde se utiliza água de poço artesiano com muitos sais minerais ou de saneamento muito clorada.

A pintura da máquina deve ser de base epóxi e aplicada conforme orientação do fabricante da tinta. As vedações, mangueiras e correias utilizadas podem ser baseadas no tipo de base do fluido, não causando assim problemas de compatibilidade. Neste caso, também é importante a orientação pelo fornecedor, depois de uma avaliação conjunta com o cliente.

#### **5.5 Fluidos sintéticos de base Éster ou Vegetal**

Estes fluidos, embora ditos "sintéticos" (pois são isentos de óleo mineral de petróleo) possuem características mais próximas aos óleos semi-sintéticos do que os "sintéticos verdadeiros" (base polímero).

Basicamente, são fluidos onde a base mineral foi totalmente substituída por uma base vegetal ou Éster (sintética), porém, possuem emulgadores e formam emulsões semelhantes aos fluidos semi-sintéticos. Na Inglaterra são denominados de "High Lubricity Synthetics" (Sintéticos de alta lubrificação).

O seu emprego no Brasil se tornou uma tendência como forma de reduzir ou eliminar o pagamento de insalubridade aos funcionários por uso de produtos derivados de petróleo. No entanto, é importante lembrar que estes fluidos sintéticos sofrem contaminação por outros óleos (hidráulico e barramento) de base mineral durante o uso nas máquinas, tornando ineficaz a vantagem inicial. Estes fluidos apresentam excelentes propriedades lubrificantes, sendo adequados para a maioria das operações de usinagem, garantindo alta performance e alto acabamento superficial .

Infelizmente, apresentam maior tendência a espumar que os fluidos semi-sintéticos ou sintéticos verdadeiros.

Os produtos de base vegetal, apesar de serem naturais, possuem uma significativa mistura de componentes (Ésteres graxos saturados e insaturados) que podem apresentar, com o uso contínuo, problemas de resinificação, mau cheiro ou crescimento biológico. Os Ésteres sintéticos são quimicamente mais puros (> 99%) e de emprego mais seguro.

Existem diversas tecnologias disponíveis para os fluidos de corte solúvel e oriente-se sobre qual delas é a que pode proporcionar melhor custo-benefício para suas condições de trabalho e siga os procedimentos recomendados pelo seu fornecedor.

## **5.6 Refrigeração com fluidos gasosos**

O ar é o mais comum fluido gasoso utilizado, estando presente até mesmo na usinagem a seco. A refrigeração a ar comprimido visa melhorar a retirada de calor e a expulsão do cavaco da zona de corte. Os fluidos gasosos, por possuírem menor viscosidade, são mais eficientes no que tange a penetração da zona ativa da ferramenta. Outros gases como o argônio, hélio, nitrogênio e dióxido de carbono também são utilizados para a refrigeração e proteção contra oxidação, porém apenas em casos específicos, visto ser esta uma usinagem pouco econômica.

**Vantagens:**

- Menor consumo de óleo, o que reduz os custos e os impactos ao meio-ambiente;
- Melhor visibilidade;
- Prolonga a vida útil da ferramenta.

#### **Desvantagens:**

- Capacidade de lubrificação e refrigeração limitadas;
- É necessário um sistema de exaustão.

### **5.7 Refrigeração MQF (Mínima Quantidade de Fluido)**

Em consequência dos problemas que a utilização dos fluidos de corte causam ao meio ambiente, aos trabalhadores que estão diretamente expostos aos seus efeitos e os altos custos com descarte, reciclagem e manutenção destes, desenvolvem-se novas tecnologias com o intuito de amenizar todos estes efeitos e uma maneira de se fazer isso é não utilizar o fluido de corte ou então utilizá-lo na menor quantidade possível.

Segundo Novaski e Dörr (1999), nas empresas alemãs o custo do fluido chega a 17% dos custos de produção, enquanto o custo com ferramenta fica em torno de 2 a 4%. Pode-se concluir que o método conhecido como Mínima Quantidade de Fluido (MQF) é uma alternativa que está a cada dia sendo aceita pelas indústrias desde que apresente um resultado no mínimo igual ao resultado obtido com a utilização convencional do fluido de corte.

Segundo Braghini Jr. (2002), este método é considerado por muitos pesquisadores como sendo um tipo de usinagem a seco, por muitas vezes não molha o cavaco, a peça e a ferramenta. Neste processo é utilizada a menor quantidade possível de fluido de corte conjuntamente com ar comprimido que deve ser capaz de diminuir o coeficiente de atrito entre a peça e a ferramenta lubrificando-as. O óleo é pulverizado próximo a zona de corte, e devido ao baixo consumo de óleo cerca de 60 ml/h o maior custo fica por conta da aquisição dos equipamentos necessários e sua instalação, o que dificulta a sua aquisição .

Segundo Jayal e Balaji (2009), o método MQF mostra-se eficaz e vantajoso, pois oferece bons resultados promovendo uma significativa diminuição no atrito, conseqüentemente, no calor gerado em diferentes pontos da zona de corte minimizando a necessidade da refrigeração alcançada pelo fluido de corte na sua utilização convencional, ou seja, por inundação. Devido ao baixo atrito no processo as forças de corte também são menores e o acabamento superficial da peça é aprimorado e a vida útil da ferramenta é longa.

### **5.8 Refrigeração criogênica**

A refrigeração criogenia é assim chamada por trabalhar com temperaturas muito baixas na faixa de  $-150^{\circ}\text{C}$ . Para isso, utiliza-se o gás nitrogênio no estado líquido. A sua principal característica é a remoção eficaz de calor da zona de corte, além de diminuir o atrito entre o cavaco e a interface da ferramenta, ajudar na quebra do cavaco e melhorar a rugosidade da peça, seu fator negativo é o alto custo.

Segundo Yildiz e Nalbant (2008), o resfriamento criogênico pode ser utilizado das mais diversas formas, como por exemplo: para realizar o pré-resfriamento de um corpo de prova, para realizar um resfriamento direto ou indireto por jato criogênico, para realizar um resfriamento por injeção de nitrogênio líquido na zona de corte por inundação ou através de micro-orifícios na interface da ferramenta.

Este método de refrigeração não é utilizado com tanta frequência como os métodos convencionais, porém em algumas áreas específicas da usinagem este método de refrigeração mostrou-se eficiente, segundo os estudos realizados por Wang e Rajurkar (2000), as áreas que exigem uma precisão e acabamentos de qualidade bem como materiais de alta liga, cerâmica estrutural, ligas de titânio que possuem grande resistência mecânica e deste modo, exigem um alto gasto de energia para usiná-los resultando em temperaturas muito elevadas, estes materiais avançados são utilizados nas indústrias aeroespaciais, médica e odontológica, bélica, nuclear, química, alimentícia entre outras.

Portanto, para usinagem de materiais de corte complexo é necessário a redução da temperatura, alguns testes foram realizados utilizando-se jato de água pressurizado, porém não se obteve resultados satisfatórios, então se partiu para o uso da refrigeração com nitrogênio líquido testado por injeção sobre a superfície exterior da ferramenta. A temperatura depende do grau de desgaste da ferramenta, ou seja, quanto mais a ferramenta se desgasta maior é a temperatura desenvolvida no processo e o uso do nitrogênio líquido diminuiu consideravelmente a temperatura e também os desgastes sofridos pela ferramenta.

De acordo com os pesquisadores Hong e Ding (2001), que também realizaram testes utilizando o nitrogênio líquido como método de refrigeração, entretanto, com uma configuração diferente da citada anteriormente, na qual os jatos de nitrogênio atingem concomitantemente as principais zonas de geração de calor e desta forma motiva uma economia na utilização deste gás liquefeito uma vez que não é possível realizar a sua circulação pela máquina já que o nitrogênio líquido evapora em contato com a atmosfera.

## **5.9 Usinagem a seco**

Considerada pelos pesquisadores Noordin, Venkatesh e Sharif (2007) como a usinagem do futuro, visa principalmente a preocupação com o meio ambiente, ela está sendo alvo de muitas pesquisas e melhorias constantes para atender o mercado de forma tão eficiente quanto à usinagem com a utilização do fluido de corte.

Sreejith e Ngoi (2000) cogitam sobre a importância da utilização do corte a seco pelas indústrias tendo como uma das principais vantagens a minimização dos custos indiretos de usinagem, considerando que o descarte do fluido de corte é muito caro e perigoso aos trabalhadores e ao meio ambiente, isso já não ocorre no corte a seco onde a poluição ambiental é inexistente.

No processo de usinagem a seco, a ferramenta de corte necessita ser fabricada com elementos que resistam ao trabalho a que será submetida, sem qualquer tipo de refrigeração e lubrificação, sem perder a precisão dimensional e nem desgastar-se rápido demais, pois isso acarretará num trabalho a mais com a substituição precoce da ferramenta.

Prosseguindo com o esboço de Noordin, Venkatesh e Sharif (2007) sobre a usinagem a seco, pode-se afirmar que o principal incremento com relação à fabricação da ferramenta é de que maneira ela será revestida, qual será o material com as características mais adaptadas para o devido trabalho bem como as características que o seu substrato necessita apresentar para que resista as forças e as altas temperaturas durante o torneamento, aonde nem todos os materiais de ferramentas possuem as propriedades solicitadas para um corte sem fluido com os mesmos parâmetros de usinagem quando se utiliza de um método convencional de refrigeração como o fluido de corte.

Segundo os estudos de Novaski e Dörr (1999) um revestimento de boa qualidade para serem aplicados nas ferramentas são os metais da classe K, que possuem boa dureza a quente e resistência a difusão e oxidação.

Os autores Ghani, Choudhury e Masjuki (2004) descrevem que um revestimento apropriado contribui para redução do atrito na interface peça-ferramenta e cavaco-ferramenta com isso o calor gerado e a temperatura também diminuem. Entretanto, estes revestimentos não são confiáveis quanto a sua tenacidade já que não absorvem o impacto e se quebram facilmente quando submetidos a trancos ou colisões por isso é importante desenvolver o substrato para concentrar os impactos sofridos pois sua tenacidade é maior que a do seu revestimento.

## **5.10 Efeitos nocivos causados por fluidos de corte refrigerantes à saúde ocupacional e ao meio ambiente**

### 5.10.1 Efeitos à Saúde Ocupacional

A alta rotação (rpm), atingida pelas máquinas e ferramentas e a pressão do jato de fluido refrigerante durante a usinagem conjuntamente com a alta temperatura, provocam a formação de névoas, que se dispersam no ambiente, podendo ocorrer o risco da inalação desses vapores de efeito nocivo a saúde do trabalhador. Diversas irritações das vias respiratórias são alguns dos principais efeitos causados.

Sobre a exposição nessa atmosfera os indivíduos podem apresentar irritação pulmonar, dificuldade respiratória, irritação no nariz e na garganta. Podem ocorrer outras doenças, devido ao contato de partes do corpo do colaborador em contato com o fluido de usinagem causando irritações da pele (alergias) ou erupções cutâneas, ressecamento, irritações nos olhos, vias respiratórias e até distúrbios gastrointestinais.

Podem também surgir dermatoses no corpo pelo contato rotineiro do abdômen do trabalhador com a máquina impregnada pelo fluido.

Os microorganismos contaminam as emulsões. Pequenas dosagens ou adições constantes de biocidas formam micróbios resistentes, com isso aumenta a quantidade de biocida nas emulsões por não apresentar mais os mesmos resultados. Contudo, os biocidas não agem somente sobre os microorganismos nas emulsões, as bactérias nas mãos dos operadores também contribuem para essa contaminação, não formando assim a barreira protetora natural da pele, conseqüentemente aparecendo os eczemas e fungos.

O potencial cancerígeno dos fluidos de corte contidos em certas substâncias que podem estar presentes na sua composição. Dentre elas se destacam os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos que se formam devido às reações de pirólise que ocorrem nas operações (CATAI; BIANCHI, 2006).

Figura 12: Irritação cutânea em operador causada por contaminação



Fonte: o autor.

Para cada tipo de operação é recomendado um determinado tipo de fluido, sendo o fabricante do produto quem orienta a correta diluição que cada fluido deve seguir, bem como a correta adição e diluição de aditivos e de biocidas. Os efeitos desfavoráveis podem ser geralmente evitados se seguindo os alertas e procedimentos descritos nas fichas de informações de segurança dos produtos químicos (FISPQ).

#### 5.10.2 Efeitos Nocivos ao Meio Ambiente

Os fluidos sintéticos, bem como as emulsões, possuem uma série de produtos químicos em sua composição de difícil tratamento e que, se lançados diretamente nas galerias pluviais ou no solo, certamente irão provocar danos ao ecossistema e ao meio ambiente.

Um outro problema é a contaminação do ar em decorrência dos vapores gerados pelo contato com superfícies quentes entre as peças e ferramentas utilizadas. A avaliação de risco, varia de acordo com as propriedades físico-químicas de cada fluido de usinagem, da velocidade de rotação das peças trabalhadas e do aquecimento das superfícies.

Do ponto de vista ambiental, os fluidos de corte mais indesejáveis, são os que possuem cloro em sua composição, sendo alvo de severas restrições.

Se os fluidos de usinagem para descartes forem lançados na rede pluvial ou diretamente em um rio, devido à sua elevada demanda química de oxigênio, retira da água o oxigênio contido primordial para a conservação da vida aquática, causando morte de peixes e algas. Além disso, possuem alto teor tóxico, devido às substâncias químicas presentes em sua composição e a outras substâncias e compostos que se formam durante o uso: como metais pesados, partículas metálicas, nitritos, amins, derivados de boro, hidrocarbonetos solubilizados, óleos livres, fenóis, poluição da água, poluição do solo, parafinas cloradas, óleos sulfurados, fosforados e sulfoclorados.

Os fluidos a base de óleo possuem ainda o agravante de dificultar a troca entre o oxigênio e a atmosfera, além de formarem compostos contínuos como as parafinas cloradas (CATAI; BIANCHI, 2006).

## 6 USINAGEM DE RODAS DE ALUMÍNIO - DIAMANTAÇÃO

### 6.1 A diamantação de rodas de alumínio

A prata e o magnésio se forem polidos ficam brilhantes, mas o magnésio é muito mais sensível que a prata, pois qualquer umidade o deixa com aspecto opaco. Porém, ele é muito mais rígido que a prata. O diferencial positivo do magnésio na composição das rodas é sua leveza e rigidez, diminui o peso não suspenso do automóvel, aquele em a suspensão não atua.

O grande problema era o seu alto custo, perdia facilmente o brilho e caso a roda quebrasse não havia conserto.

Então, os fabricantes encontraram outra solução, uma liga a base de alumínio e outros componentes denominada de antálio. O antálio é mais pesado que o magnésio, porém não perde facilmente o brilho, o polimento durava até três meses, sendo que para voltar à forma normal de brilho, apenas um polimento manual com produto específico já resolvia. As rodas de antálio já saíam de fábrica polidas e era só manter o brilho, de seis em seis meses. Já as de magnésio saíam em estado bruto, sem polimento, aí havia a necessidade de especialistas fazerem o serviço com as máquinas politriz manuais.

A diamantação de rodas é um processo mais avançado, foi desenvolvido para substituir o polimento. Com a melhoria nos processos de ligas das rodas o material modificou, são agora de alumínio com ligas na sua composição de Si, Ti, Sr, B e Mg.

Na diamantação as rodas recebem uma pintura para depois serem usinadas em torno especial de alta rotação (Puma Classic, 2013).

Na usinagem de diamantação é removida a pintura e parte do material da roda em dois passes de usinagem, um para retirada do material e outra para a diamantação ou acabamento espelhado propriamente dito aparecendo o alumínio usinado que por si só é um material brilhante e nesse trabalho ganha mais brilho. A função do óleo lubri-Refrigerante é para resfriamento da ferramenta (inserto de diamante) e para lubrificação que é o fator determinante na qualidade do espelhamento e também responsável pela retirada do cavaco para que este não risque a região espelhada, depois desse processo a roda é lavada para retirada do óleo utilizado na usinagem e qualquer outro agente existente, para deixá-la limpa, sem gorduras, porque o próximo passo é a aplicação de um verniz especial, que é levado ao forno para aderência e cura do material.

No processo de diamantação ou espelhamento de rodas de alumínio sua usinagem consiste na utilização de uma ferramenta ou pastilha conhecida como PCD (Diamante Poli Cristalino), de extrema dureza que, quando em contato com a peça de alumínio em alta rotação, produz um brilho de natureza singular.

Abaixo segue as imagens (figura 13) de duas rodas, uma pintada antes do processo de diamantação e a outra, já realizado o processo de usinagem por diamantação.

Figura 13: Roda sem Diamantação



e Roda com Diamantação



Fonte: o autor.

## 6.2 Itens de controle nas operações de Usinagem

Como usinagem é um processo visando atender especificações de normas ou desenhos, necessita-se de planos de controle, na usinagem da Mangels os controles são feitos através de formulários específicos para cada modelo, na liberação da máquina o programador de CNC precisa preencher um relatório, utilizando instrumento de medição como:

- Paquímetros
- Relógio comparador
- Espessímetros
- Máquina Tridimensional

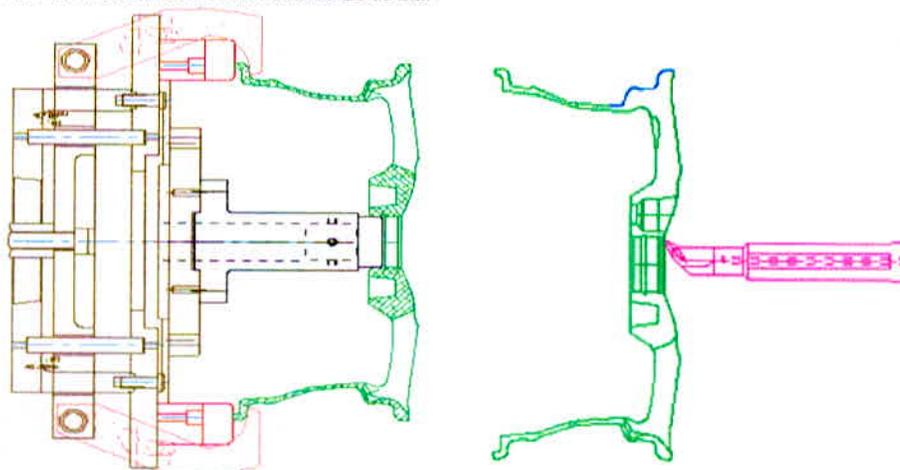
E após a máquina liberada pelo programador CNC o Inspetor de Qualidade faz as medições de 03 em 03 horas.

Algumas dimensões utilizam calibradores para controle dimensional, onde na maioria das vezes são utilizados 100% pelo operador de máquina (Conforme tabela ou relatório de inspeção que se encontra no setor de usinagem).

### 6.3 Processo de Diamantação de rodas

Após a roda passar pelo processo de usinagem e demais processos até seu acabamento final no setor de pintura, a mesma segue para a célula de diamantação onde será retirado uma pequena quantidade de material na região conhecida como máscara da roda em um torno de alta rotação (2500rpm), com dois passes de operação da ferramenta na qual a velocidade de avanço para o primeiro passe  $f_1$  (avanço desbaste = 0,3mm/volta) e o segundo  $f_2$  (avanço diamantação (acabamento) = 0,07mm/volta). Neste processo a pastilha de diamante (PCD) tem sua vida útil estimada a cada duas mil rodas diamantadas.

Figura 14: Usinagem de Diamantação de rodas



Fonte: (Engenharia de Processos Mangels, 2001).

### 6.4 Dispositivos de fixação

Os dispositivos para fixação de peças em máquinas CNC podem ir desde simples placas pneumáticas, até sofisticados sistemas hidráulicos ou eletro-eletrônicos comandados por computadores e carregados / descarregados por robôs.

Acima de tudo devem atender principalmente aos seguintes requisitos:

- Rigidez na usinagem das peças;
- Fácil acesso da peça;
- Repetibilidade na localização das peças;
- Rápida preparação de máquina;
- Fácil fabricação e vida longa;
- Baixo custo de confecção.

## 6.5 Ferramentas de corte utilizadas no setor de usinagem de alumínio

- Alumínio em geral pode ser facilmente usinado;
- A energia consumida por unidade de volume do metal é muito baixa;
- Apenas o magnésio e suas ligas podem ser usinadas com a mesma taxa de energia consumida e o desgaste da ferramenta raramente é um problema;
- Exceção feita às ligas de alumínio-silício, onde as partículas de silício presentes são altamente abrasivas e desgastam rapidamente a ferramenta de metal duro.

6.5.1 As temperaturas de usinagem são geralmente baixas e altas velocidades de corte podem ser usadas

Com relação aos critérios de usinabilidade baseados na rugosidade da peça e na característica do cavaco, não se pode dizer que o alumínio tenha uma boa usinabilidade, pois, o cavaco formado é longo e o acabamento superficial insatisfatório. Porém, bons acabamentos superficiais podem ser obtidos se a velocidade de corte for suficientemente alta e a geometria da ferramenta for adequada.

A usinagem do alumínio pode ser afetada pelos elementos de liga, impurezas, processos de fundição e tratamentos aplicados ao metal. As propriedades mecânicas e térmicas do alumínio são fatores decisivos na usinagem de suas ligas. O alumínio apresenta um módulo de elasticidade de 1/3 do módulo de elasticidade do aço. Isto significa que, sob a mesma força de corte, o alumínio se deforma três vezes mais que o aço.

Figura 15: Módulo de elasticidade do aço e do alumínio

PROPRIEDADES FISICAS	ALUMINIO	AÇO
MÓDULO ELASTICIDADE (Mpa)	70000	210000

Fonte: (MOOK; SHAHABI; RATNAM, 2009)

**Baixo módulo de elasticidade** - Este fato tem conseqüências negativas na obtenção de boas superfícies usinadas e pode gerar deformações indesejadas da peça. Devido a isto também, não se deve utilizar esforços exagerados na fixação da peça. Este fato favorece a usinagem destas ligas, já que a elevação da temperatura é inerente ao processo de usinagem e, as ligas

de alumínio, por possuírem alta condutividade térmica, atraem para a peça boa parte do calor gerado. Assim, as forças de corte necessárias para a usinagem das ligas de alumínio são bem baixas, quando comparadas com as forças relativas aos aços. A alta condutividade térmica do alumínio favorece a usinabilidade, mas é necessário que a dureza da liga seja maior que 80 HB para reduzir a tendência à formação da aresta postiça de corte.

O coeficiente de dilatação térmica do alumínio, por ser maior que o aço e do latão, pode gerar dificuldades de obtenção de tolerâncias apertadas.

### Elementos de Liga e suas Influências na Usinabilidade do Alumínio

Quadro 1: Tabela de elementos de liga e a sua influência na usinabilidade

Elementos de Liga	Influência na Usinabilidade
Sn, Be e Pb	Atuam como lubrificantes e como fragilizadores do cavaco.
Fe, Mn, Cr e Ni	Combinam entre si ou com o alumínio e/ou para formarem partículas duras, que favorecem a quebra do cavaco e que, em grande quantidade, tem efeito abrasivo sobre a ferramenta.
Mg	Em teores pequenos (cerca de 0,3%) aumenta a dureza do cavaco e diminui o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta.
Si	Aumenta a abrasividade da peça – a vida da ferramenta diminui com o aumento do tamanho da fase primária do silício.
Cu	Forma o intermetálico CuAl, que fragiliza o cavaco
Zn	Não exerce influência na usinabilidade.

Fonte: (MOOK; SHAHABI; RATNAM, 2009)

#### 6.5.2 Ferramentas de metal duro utilizadas na usinagem do alumínio

O material de ferramenta típico para usinagem de ligas de alumínio (com exceção das ligas de alumínio-silício) é o metal duro **classe K** sem cobertura.

A **classe K** é recomendada, pois as temperaturas de corte são baixas e, por isso, a formação do desgaste de cratera via processo difuso não é um problema.

Por outro lado, metais duros a base de carboneto de titânio (**classe P**) são inadequados para a usinagem de alumínio, devido à grande afinidade físico-química entre o alumínio e o titânio.

As ligas eutéticas e hiper-eutéticas de alumínio-silício geram altas taxas de desgaste de flanco.

Ferramentas de diamante policristalino tem sido usadas com sucesso sem um desgaste excessivo, que geralmente acontece quando elas são usinadas com ferramentas de metal duro.

Outro fator importante para uma maior vida útil da ferramenta é a utilização do óleo solúvel (lubri-refrigerante) adequado ou de outro sistema que possa resfriar a ferramenta durante o contato com a peça na operação de usinagem. No caso da usinagem de diamantação de rodas é utilizado um tipo de ferramenta ou inserto de alta dureza conhecido como PCD, do qual estaremos a seguir falando mais a respeito.

**Ferramenta de diamante** - As ligas eutéticas e hiper-eutéticas de alumínio-silício geram altas taxas de desgaste de flanco. Ferramentas de diamante policristalino tem sido usadas com sucesso sem um desgaste excessivo, que geralmente acontece quando elas são usinadas com ferramentas de metal duro.

#### **Diamante Policristalino – PCD**

- Material sintético obtido em condições de extrema pressão e temperatura;
- Propriedades semelhantes ao encontrado no diamante natural, porém mais homogêneo;
- São usados na usinagem de materiais não ferrosos e sintéticos;
- Ocorre grafitização para uma determinada condição de corte.

Os principais benefícios do inserto para alumínio são o acabamento superficial e a durabilidade da peça usinada, por isso, são muito utilizadas em indústrias automotivas e aeroespaciais, cada qual indicado para determinadas aplicações. Os insertos para alumínio ainda apresentam diferenciais como quebra-cavaco AL com ângulos superpositivos, além disso, também contam com aresta com grande capacidade de corte e superfície 100% polida, permitindo assim um corte mais suave, com o objetivo de evitar o problema de aderência do alumínio com o inserto.

Quadro 2: Tabela de formatos para utilização de pastilhas na usinagem de alumínio.

Designação de formato básico, ângulo de ponta	R	S 90°	C 80°	W 80°	T 60°	D 55°	V 35°
Desbaste (resistência)	●	●	●	○	○	●	●
Desbaste leve/semiacabamento (n°. de arestas)		○	●	●	●	●	●
Acabamento (n°. de arestas)			○	○	●	●	●
Torneamento longitudinal (direção de avanço)			●	○	○	●	●
Perfilamento (capacidade de acesso)			○	○	○	●	●
Faceamento (direção de avanço)	○	●	●	●	○	○	○
Versatilidade operacional	○		●	○	○	●	○
Potência limitada da máquina			○	○	●	●	●
Tendências a vibrações				○	●	●	●
Material duro	●	●					
Usinagem intermitente	●	●	○	○	○		
Ângulo de posição grande			●	●	●	●	
Ângulo de posição pequeno	●	●		●	●		

● Mais adequado      ○ Adequado

Fonte: (TOOLTECH, 2010)

Tabela 1: Tabela raio de ponta para insertos de usinagem.

**Classificação**

Raio da ponta	Ângulo de Correção $\sigma^\circ$															
	-25~-15	-10	-5	0	5	10	15	20-35	40	45	50	55	60-65	70	75-85	90
1.2	0.04	0.03	0.01	0	0.02	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.02	0.01	-0.01	0	0.01	0
0.8	0.03	0.02	0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0	-0.01	0	0.01	0
0.4	0.02	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0	-0.01	-0.01	0	0

O número -&gt; números: ajuste do ângulo de alívio, -números: ajuste do ângulo de ataque (mm)

Fonte: (mitsubishicarbide)

Cada pastilha tem sua determinada função dentro do processo de usinagem de rodas de alumínio cabe aos técnicos e engenheiros responsáveis pelo processo de usinagem saber diferenciar sua utilização através dos elementos de liga a compõe bem como a sua influência na usinabilidade do material a ser transformado, no nosso caso o alumínio.

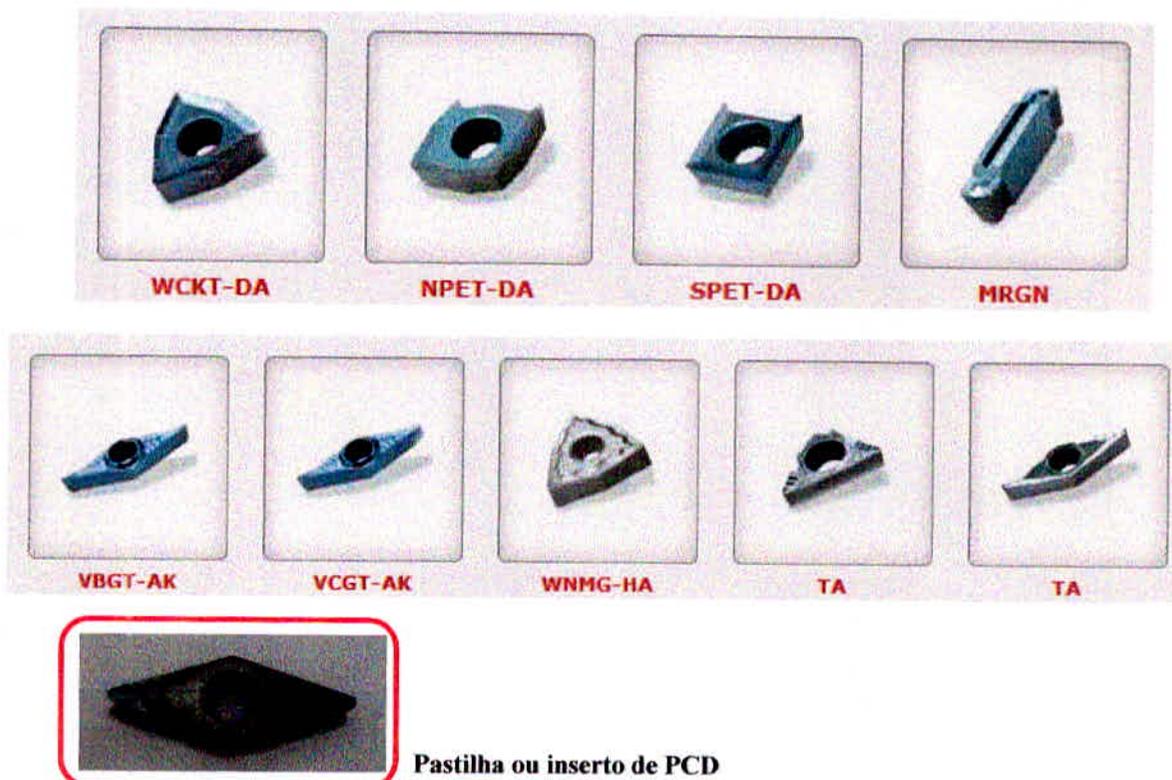
O custo das pastilhas de metal duro como também os custos de preparação destas ferramentas são altos, como consequência disto, é de suma importância saber escolher corretamente a melhor pastilha para determinada aplicação. Não existe uma regra geral para tal escolha, mas vamos descrever abaixo alguns pontos que, se observados, irão ajudar bastante na escolha econômica da pastilha.

- 1) Selecionar a geometria que ofereça o maior número de arestas possíveis;
- 2) Selecionar o tamanho da aresta do inserto baseado na quantidade de material a ser removido;

3) Selecionar a tolerância apropriada do inserto para o tipo de aplicação exigida.

Na maioria dos casos uma classe geral executará todo o trabalho. Quanto menor a tolerância, mais elevado se torna o custo do inserto. As tolerâncias apertadas do inserto são requeridas normalmente quando a repetibilidade passa a ser um fator importante, ou seja, necessidade de precisão dimensional (TOOLTECH, 2010).

Figura 16: Tipos de pastilhas para usinagem de alumínio.



Fonte: (TOOLTECH, 2010)

## **7 PROPOSTA DE UM PORTA-FERRAMENTA A AR REFRIGERADO PARA OPERAÇÕES DE USINAGEM COM AR COMPRIMIDO NO PROCESSO DE DIAMANTAMENTO DE RODAS DE ALUMINIO ATRAVÉS DO EFEITO JOULE – THOMSON**

### **7.1 Usinagem com ar comprimido refrigerado através do efeito Joule-Thomson**

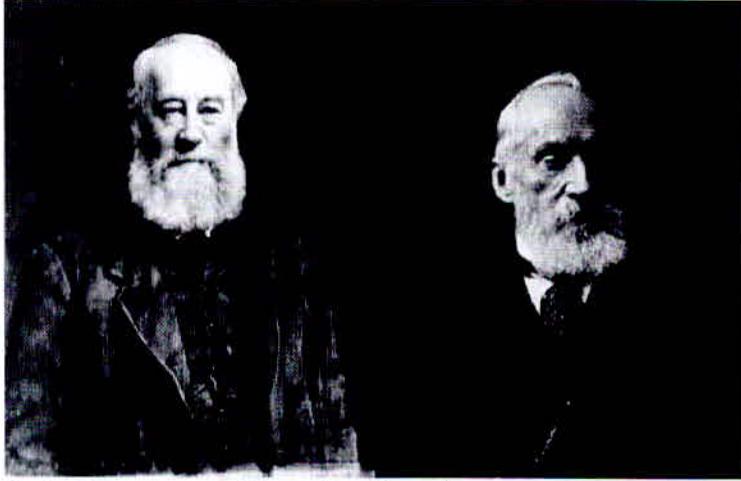
Consiste em um porta-ferramenta com canais internos onde o ar comprimido fornecido na máquina atravessa a ferramenta na unidade e é então arrefecida até abaixo de zero graus Celsius por um efeito físico conhecido como o efeito de Joule-Thomson. O efeito Joule-Thomson, que recebeu este nome em homenagem a seus descobridores, Sir Joule e Sir William Thomson (mais tarde conhecido como Barão Lord Kelvin). Este efeito explica como a temperatura varia quando um gás liquefeito se expande e volta ao estado gasoso, mantendo-se a entalpia do sistema constante.

Para demonstrar este efeito de Joule e Thomson realizaram o seguinte experimento: deixaram um gás expandir de um ambiente sobre pressão constante para outro, passando por uma membrana porosa, e monitoraram a diferença de temperatura que ocorria com a expansão. Todo o aparato foi preparado de forma que o processo fosse adiabático. Eles observaram uma temperatura menor no lado de menor pressão, e a diferença de temperatura era proporcional à diferença de pressão entre as câmaras.

A diferença de pressão, entretanto, deve ser calculada para cada tipo de gás, pois sob determinados valores o efeito Joule-Thomson pode comportar-se de maneira inversa à desejada, ou seja, aquecer ao invés de resfriar. Este processo físico-químico de resfriamento de um gás ideal por meio de sua expansão através da passagem desse gás através de um orifício é muito conhecido no nosso dia a dia nos aparelhos de refrigeração: ar condicionado, geladeiras e outros.

A temperatura de um gás é determinada pela velocidade das partículas deste gás. Tendo em um sistema fechado um gás a determinada pressão, onde parte da energia cinética deste sistema é transformada em energia potencial e em um outro sistema também fechado e vazio (vácuo), onde promovemos a expansão gasosa através de um orifício onde estas moléculas nesta expansão são desaceleradas, isto é, adentram ao outro sistema com sua velocidade diminuída, cosequentemente diminuirá sua temperatura.

Figura 17: James Prescott Joule e William Thomson



Fonte :([www.newworldencyclopedia.org](http://www.newworldencyclopedia.org))

### 7.1.1 Experiência do efeito Joule-Thomson

Determinar experimentalmente a variação da entalpia com a pressão em condições de temperatura constante:

$$\mu_T = \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T$$

### Varição da Energia Interna

Para um sistema fechado,  $dU$  é função do Volume e da Temperatura

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV + \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT$$

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV + C_v dT$$

Pressão interna

$$\pi_T = \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T$$

Então substituímos

$$dU = \pi_T dV + C_v dT$$

Para um gás perfeito não há interações entre as moléculas, a energia interna é independente do volume da amostra

$$\left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = 0$$

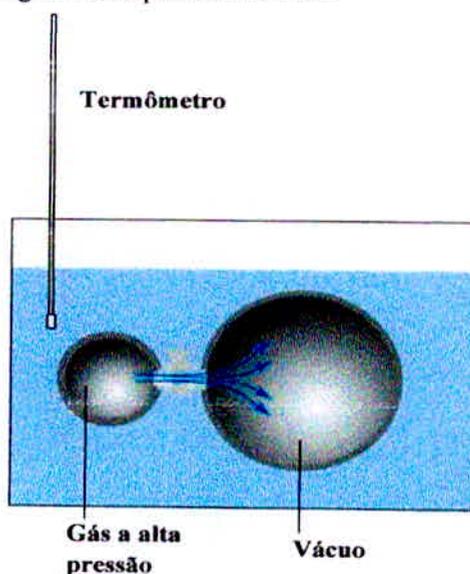
### Energia interna e expansão isotérmica do gás perfeito

Expansão devido ao vácuo:  $w = 0$

Não há troca de calor no sistema:  $q = 0$

Para um gás perfeito,  $\pi_T$  (pressão interna) não depende do volume:

Figura 18: Experiência de Joule



Fonte: (ATKINS, 1999).

### Varição da energia interna com a Temperatura a P (pressão) constante

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P = \pi_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P + C_v$$

Coeficiente de expansão (térmica)

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

Dependência entre U e T a pressão constante

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P = \alpha \pi_T V + C_v$$

### Dependência da entalpia (H) com a Temperatura

$$H = U + P V$$

Varição de H a Volume constante

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_V = \left(1 - \frac{\alpha \mu}{\kappa_T}\right) C_p$$

### Compressibilidade isotérmica $\kappa_T$

$$\kappa_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \quad ; \text{ onde } \kappa_T > 0$$

Para um gás ideal  $\kappa_T = 1/p$

## Coefficiente Joule-Thomson $\mu$

$$\mu = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$$

### Efeito Joule-Thomson, o resfriamento de um gás numa expansão adiabática

Condições isentálpica

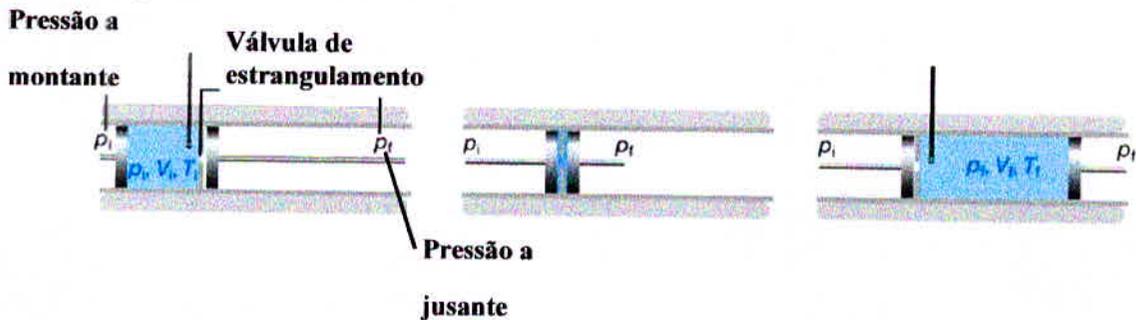
Expansão de uma  $P_i$ cte até  $P_f$  constante

Isolamento térmico  $\rightarrow$  processo adiabático

Medida de  $\Delta T$

Em um tubo isolado ( $dq = 0$ ) foi ajustado um obstáculo, inicialmente um lenço de seda (disco poroso/diafragma), a fim de gerar uma variação de pressão entre os lados esquerdo e direito, de modo que  $P_1 > P_2$  (efusão).

Figura 19: Experiência de Joule-Thomson



Fonte: (ATKINS, 1999).

Aplica-se uma leve pressão no pistão da esquerda, apenas o suficiente para provocar um fluxo estacionário (sem modificação de  $P_1$ ) da esquerda (estado inicial) para a direita (estado final).

As condições nos estados inicial e final são determinadas por termômetros e manômetros acoplados ao tubo.

Devido à obstrução ( $P_1 > P_2$ ), o gás será forçado a se deslocar lentamente através do disco poroso efetuando uma expansão.

O fluxo de gás age como um pistão e conduz o gás para fora do sistema. A fronteira do sistema é móvel, acompanha a movimentação do gás e envolve sempre a mesma massa de gás.

Durante a expansão foi observada uma redução de temperatura no lado de menor pressão. Esse fenômeno é conhecido como resfriamento por expansão adiabática ou efeito de Joule-Thomson para resfriamento.

A temperatura fica mais baixa do lado onde a pressão **P** é mais baixa.

$$\Delta T \propto \Delta P$$

### **Coefficiente Joule-Thomson isotérmico**

$$\mu_T = \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T$$

$\mu > 0$  Resfriamento na expansão

$\mu < 0$  Aquecimento na expansão

Em nosso projeto, o efeito Joule-Thomson, faz com que o ar seja dividido em uma corrente quente e uma corrente fria. O ar frio incide na parte frontal do inserto, o ar quente entra através de orifício na parte traseira do porta ferramenta, como mostram as figuras 20 e 21.

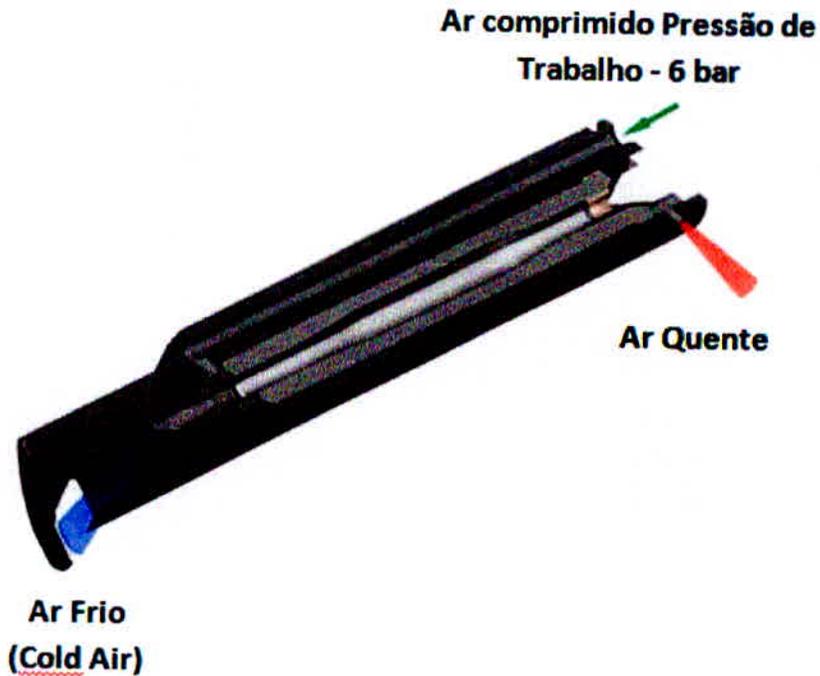
A tendência mundial visa à usinagem sem fluido de corte (a seco), que objetiva reduzir de forma significativa custos com a compra de fluidos de corte e sua destinação final, bem como problemas ocupacionais, tais como doenças de pele (dermatites) e variações de sintomas respiratórios, e relacionados ao meio ambiente, onde os fluidos de corte tornam-se graves poluentes da água, solo e ar.

A fabricante de ferramentas de corte Ceratizit lançou um sistema para aplicação interna de refrigeração pneumática que possibilita a usinagem a ar refrigerado (fluido gasoso) do alumínio, um metal que, devido ao modo de formação do seu cavaco e do difícil arranque, impondo o uso de fluido de corte.

Neste sistema, denominado MAC, o ar comprimido é resfriado a temperaturas abaixo de zero, e aplicado a uma vazão mínima de 400L/min e pressão de 6 bar diretamente entre a

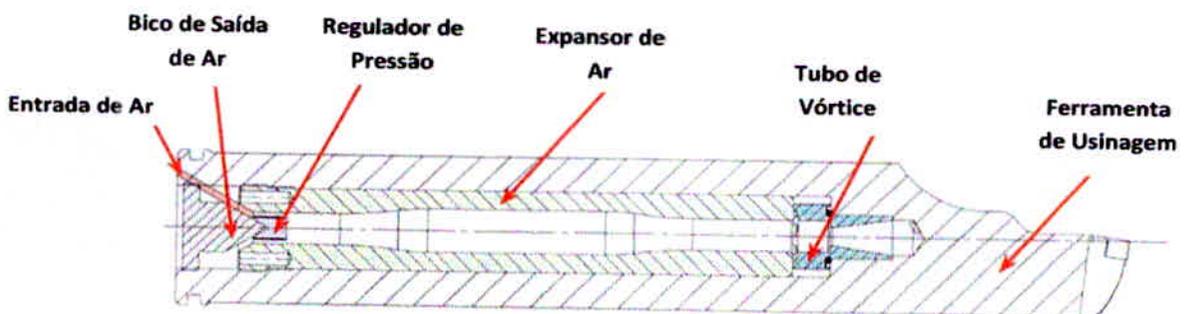
aresta de corte e a peça, através de furos laterais na parte frontal da ferramenta. O ar frio reduz a temperatura do cavaco, diminui a tendência de adesão do alumínio e facilita a remoção de material (CERATIZIT, 2013).

Figura 20: Porta ferramenta sistema Cold-Air



Fonte: (CERATIZIT, 2013).

Figura 21: Porta ferramenta sistema Cold-Air - vista em corte.



Fonte: (CERATIZIT, 2013).

## 8 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios, foram utilizados modelos de rodas de alumínio com sua composição estrutural em liga AlSi-11%, onde a mesma não passa pelo processo de tratamento térmico (Solubilização e Envelhecimento) como as rodas de liga AlSi-7%, das quais sua resistência e dureza são maiores, o intuito do ensaio com rodas de liga AlSi-11% é devido a estrutura do material possuir um regime de escoamento maior, com isso a ocorrência de aresta postiça ou empastamento do material na ponta da pastilha durante o processo de usinagem a ar refrigerado será mais propícia, um fator preocupante que não será aceito, provocando assim o insucesso da análise. Os testes ocorreram no setor de Usinagem de Diamantação, onde foi estabelecido o torno para a realização dos testes.

Inicialmente foram realizados ensaios com o sistema de usinagem já existente por refrigeração de fluido de corte solúvel em água (óleo sintético).

Foram também realizados ensaios de bancada com o porta ferramenta de refrigeração a ar comprimido para a comprovação do perfeito funcionamento do dispositivo Cold-air, bem como para os cálculos e coleta de dados visto que há a necessidade de adaptação da mangueira de ar comprimido para dentro do torno para acoplamento com o dispositivo e a placa do torno para alojamento do mesmo.

### 8.1 Realização do ensaio no processo de usinagem de diamantação

Passamos agora para o teste de usinagem em torno de diamantação, onde procederemos da seguinte maneira: primeiramente realizaremos os testes com o processo de diamantação já existente, depois passaremos para o teste com o porta ferramentas a ar refrigerado (usinagem com fluido gasoso).

O torno para a realização dos testes é um torno CNC previamente programada para a retirada de sobre-metal da roda, a usinagem propriamente dita, onde é feita a programação do modelo da roda a ser usinada. Este torno realiza a operação de usinagem da roda (diamantação), a uma rotação constante de  $n = 2500\text{rpm}$ , há a necessidade de uma alta rotação da máquina neste processo para garantir uma melhor qualidade no que tange ao acabamento final da roda diamantada.

Para os dois processos, refrigeração a óleo e refrigeração a ar refrigerado, como a rotação de usinagem já é pré-determinada e constante, tanto a velocidade de corte quanto a velocidade de avanço são desprezíveis. Contudo, calculamos estas para nível de

demonstração, bem como a rugosidade teórica da superfície acabada (h), seguem abaixo os cálculos:

### Velocidade de corte

$$VC = \pi * d * n / 1000 \quad \text{onde:}$$

$V_c$  – Velocidade de corte (m/min);

$d$  – Diâmetro da borda externa (mm);

$n$  – Rotação (rpm);

1000 – Fator de conversão de unidades.

$$V_c = \pi * 440,2\text{mm} * 2500\text{rpm} / 1000$$

$$V_c = 3457 \text{ m/min}$$

### Velocidade de Avanço

$$V_f = f * n \quad \text{onde:}$$

$V_f$  – Velocidade de Avanço (mm/min);

$f$  – avanço (mm/rot);

$f_1$ (avanço desbaste = 0,3mm/rot)

$f_2$ (avanço diamantação (acabamento) = 0,07mm/rot)

$n$  – Rotação (rpm).

$$V_f (\text{desbaste}) = f_1 * n$$

$$V_f (\text{desbaste}) = 0,3\text{mm} * 2500\text{rpm}$$

$$V_f (\text{desbaste}) = 750 \text{ mm/rot}$$

$$V_f (\text{diamantação}) = f_2 * n$$

$$V_f (\text{diamantação}) = 0,07\text{mm} * 2500\text{rpm}$$

$$V_f (\text{diamantação}) = 175 \text{ mm/rot}$$

$$V_f (\text{total}) = V_f (\text{desbaste}) + V_f (\text{diamantação})$$

$$V_f (\text{total}) = 750 \text{ mm/volta} + 175 \text{ mm/rot}$$

$$Vf \text{ (total)} = 750 \text{ mm/volta} + 175 \text{ mm/rot}$$

$$Vf \text{ (total)} = 925 \text{ mm/rot}$$

A seguir seguem os cálculos para rugosidade teórica de superfície, com os seguintes valores adotados: Para **f**, utilizaremos  $f_2$  (avanço diamantação (acabamento) = 0,07mm/volta) Conforme tabela (figura 18), temos  $Re = 0,8\text{mm}$ .

### Rugosidade Teórica da Superfície Acabada (**h**)

$$h = (f^2 / (8 * Re)) * 1000$$

onde:

$h$  – Rugosidade da superfície acabada ( $\mu\text{m}$ );

$f$  – avanço (mm/rot);

$Re$  – Raio de ponta do inserto (mm).

$$h = (0,07^2 / (8 * 0,8)) * 1000$$

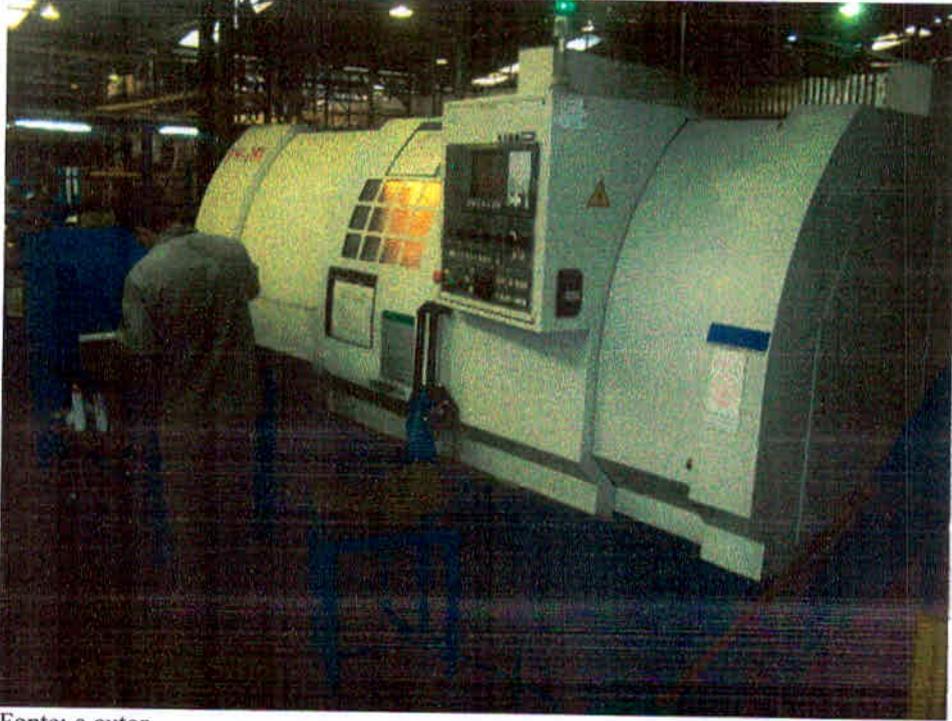
$$h = 0,765 \mu\text{m}$$

Segue a imagem do torno de diamantação de rodas utilizado para teste, no mesmo foi realizada toda programação e os parâmetros de usinagem, tanto para usinagem com óleo lubri-Refrigerante, bem como para usinagem com ar comprimido refrigerado.

Trata-se de uma máquina ferramenta CNC que trabalha em alta rotação justamente para não comprometer o acabamento final da roda diamantada, visto que uma vez a usinagem não ocorrendo de maneira ideal, esta roda será refugada, gerando assim diversos desperdícios não agregando valor algum ao processo e ao produto.

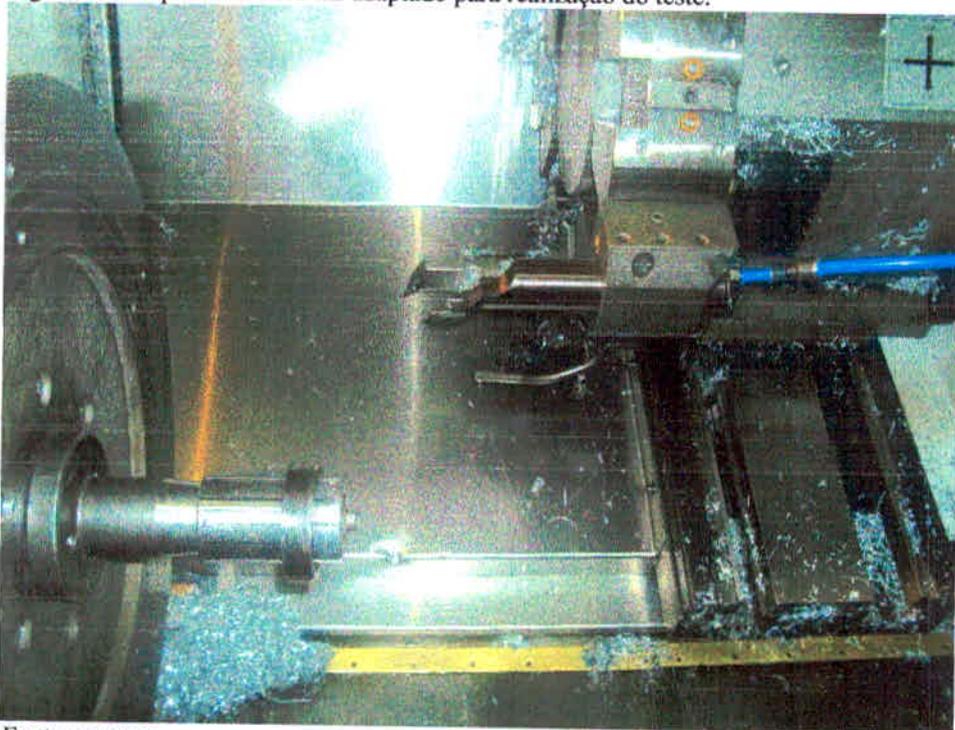
Poderiam ser adotados valores maiores para a rotação da máquina durante o processo de usinagem, porém devido ao diâmetro da placa de considerável, e também o diâmetro da roda, ambos iriam gerar uma força centrífuga muito alta o que poderia comprometer a qualidade da diamantação como também uma alta vibração da máquina durante o trabalho.

Figura 22: Torno de usinagem de diamantação de rodas.



Fonte: o autor.

Figura 23: Dispositivo Cold-air adaptado para realização do teste.



Fonte: o autor.

## 8.2 Roteiro

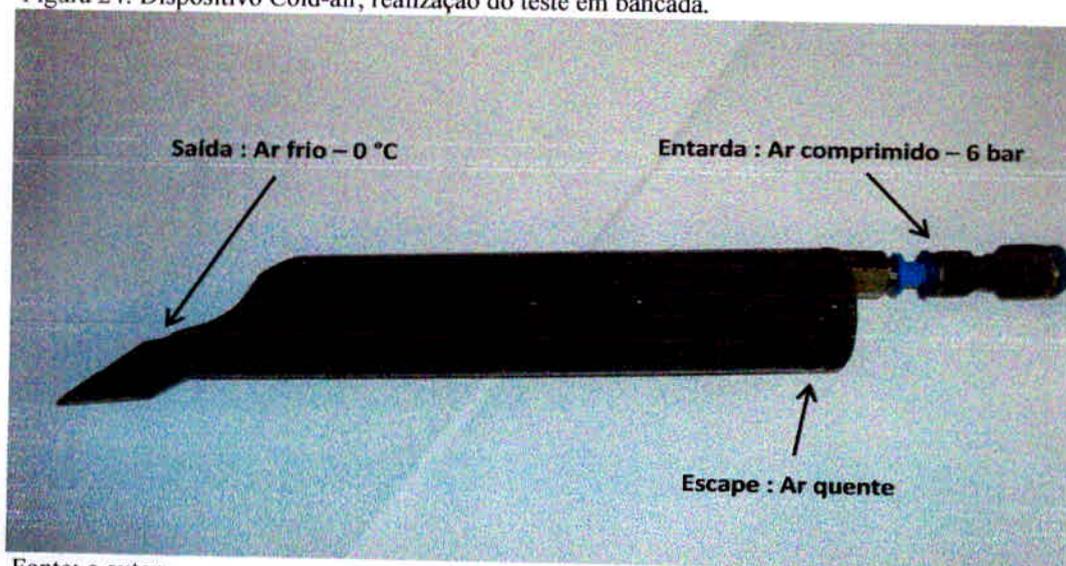
Os ensaios foram realizados seguindo um roteiro preestabelecido que foi feito com o objetivo de otimizar e padronizar a realização dos ensaios. O roteiro foi dividido em três etapas: realização do ensaio, aquisição de dados e análise dos dados, descritas a seguir.

### 8.2.1 Realização do ensaio de bancada com o dispositivo Cold-air

Os ensaios realizados em bancada seguiram as necessidades e os parâmetros indicados pelo fornecedor (CERATIZIT, 2013), como pressão de entrada de 6 bar no porta ferramenta e o inserto utilizado no processo de diamantação de rodas .

Foi utilizado um termômetro digital de precisão e calibrado para coleta das temperaturas de entrada do ar comprimido, do ar quente na saída lateral do dispositivo, bem como na saída frontal do mesmo onde se localiza o inserto de diamante recebendo o ar refrigerado como indicam as fotos abaixo:

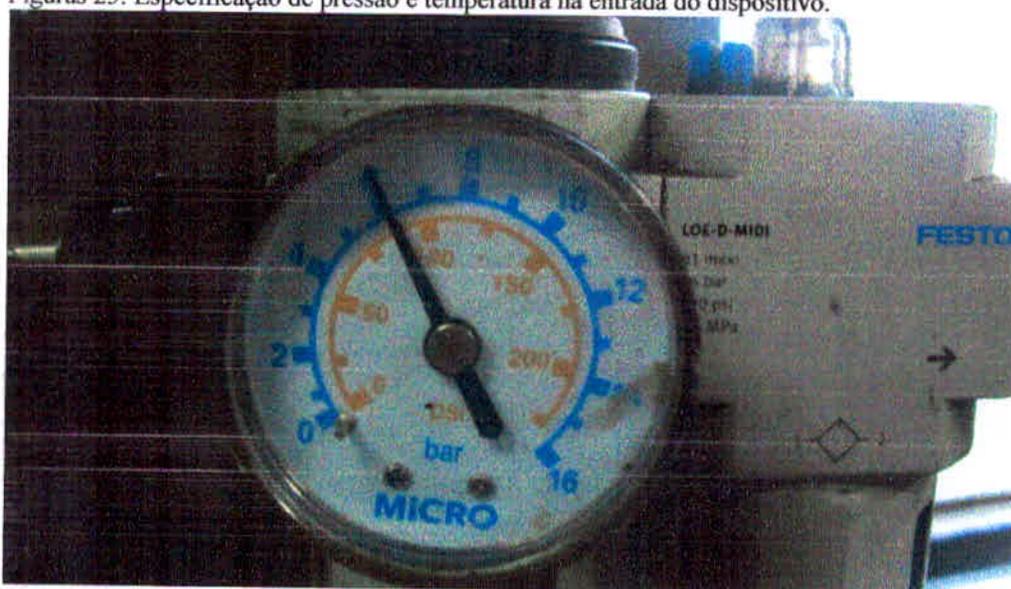
Figura 24: Dispositivo Cold-air, realização do teste em bancada.



Fonte: o autor.

Conferimos no aparelho de "lubrefil" a indicação da pressão para início do teste, onde esta pressão mostrava a indicação correta conforme especificação em **6 bar**. Medimos com o termômetro a temperatura de entrada do ar comprimido que mostrou em seu visor a temperatura de **14,9°C (287,9 K)**, conforme seguem as imagens a seguir:

Figuras 25: Especificação de pressão e temperatura na entrada do dispositivo.



Fonte: o autor.

Figuras 26: Especificação de pressão e temperatura na entrada do dispositivo.



Fonte: o autor.

Fechado o ar comprimido, conectamos a mangueira de ar comprimido no engate rápido do porta ferramenta e abrimos novamente a válvula do ar para a medição das temperaturas de ar quente no escape na lateral do dispositivo, onde encontramos a temperatura de  $27,1^{\circ}\text{C}$  ( $300,1\text{ K}$ ), o que não será nosso objeto de estudo, e posteriormente a temperatura do ar frio na saída frontal onde se localiza o inserto diamantado apresentou a temperatura negativa de  $-0,3^{\circ}\text{C}$  ( $272,7\text{ K}$ ), conforme constatamos nas imagens a seguir:

Figuras 27: Temperaturas de escape lateral e saída frontal do dispositivo.



Fonte: o autor.

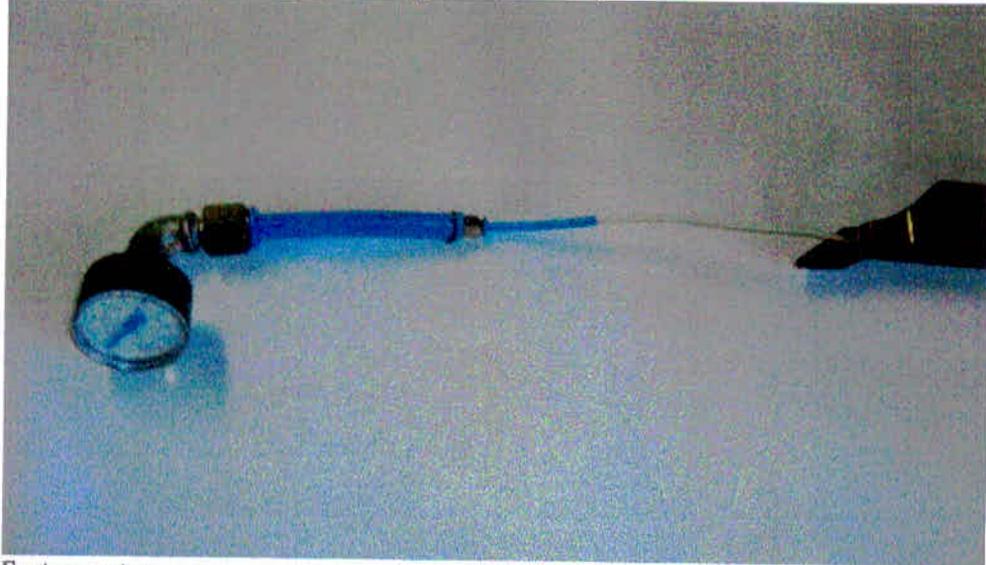
Figuras 28: Temperaturas de escape lateral e saída frontal do dispositivo.



Fonte: o autor.

Com a coleta de dados através dos aparelhos de medição e demais equipamentos referentes ao ensaio em bancada, constatamos que o dispositivo demonstra na prática o experimento de Joule-Thomson, no qual a expansão gasosa através de um orifício onde estas moléculas de ar neste caso nessa expansão são desaceleradas, isto é, adentram ao outro sistema com sua velocidade reduzida, cosequentemente diminui assim a sua temperatura. Medimos também a pressão de saídado ar frio na região frontal do porta ferramenta para refrigeração da pastilha onde constatou-se a temperatura de **2,50 bar** conforme o teste realizado nas imagens abaixo:

Figuras 29: Pressão de saída do ar refrigerado (Cold-air)



Fonte: o autor.

Figuras 30: Pressão de saída do ar refrigerado (Cold-air)



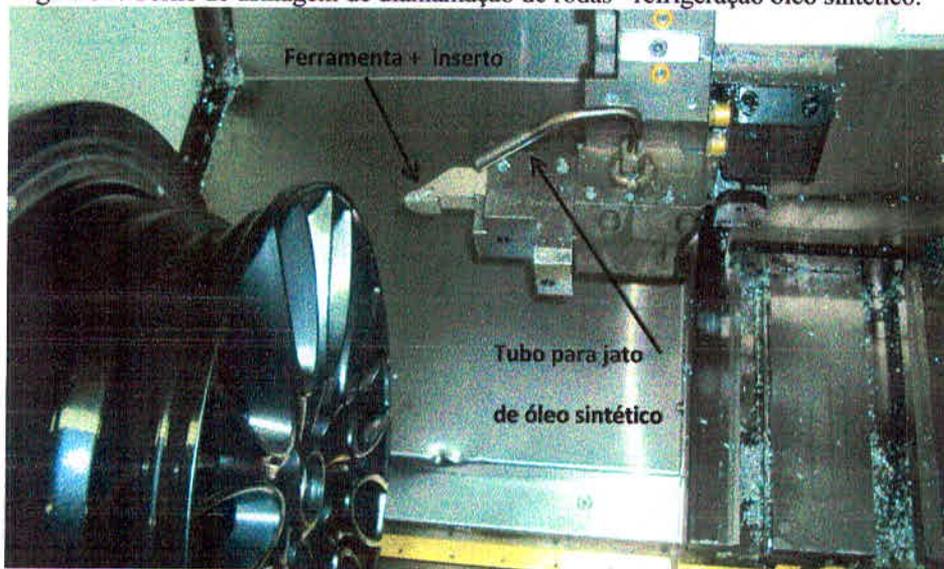
Fonte: o autor.

### 8.2.2 Ensaio de usinagem de diamantação com óleo lubri-Refrigerante (atual)

Neste processo de usinagem é removida a pintura e parte do material da roda, o óleo sintético solúvel em água utilizado como lubri-Refrigerante durante a usinagem é essencial para o resfriamento da zona de contato (peça-ferramenta) bem como a sua lubricidade no que tange a alta qualidade do acabamento do espelhamento, como também a alta rotação da máquina e a utilização correta do inserto ou pastilha conhecida como PCD, de extrema dureza que, quando em contato com a peça são os responsáveis pelo bom acabamento de espelhamento da roda diamantada aparecendo o alumínio usinado que por si só é um material brilhante e nesse trabalho ganha mais brilho. A seguir temos as ilustrações dos dispositivos

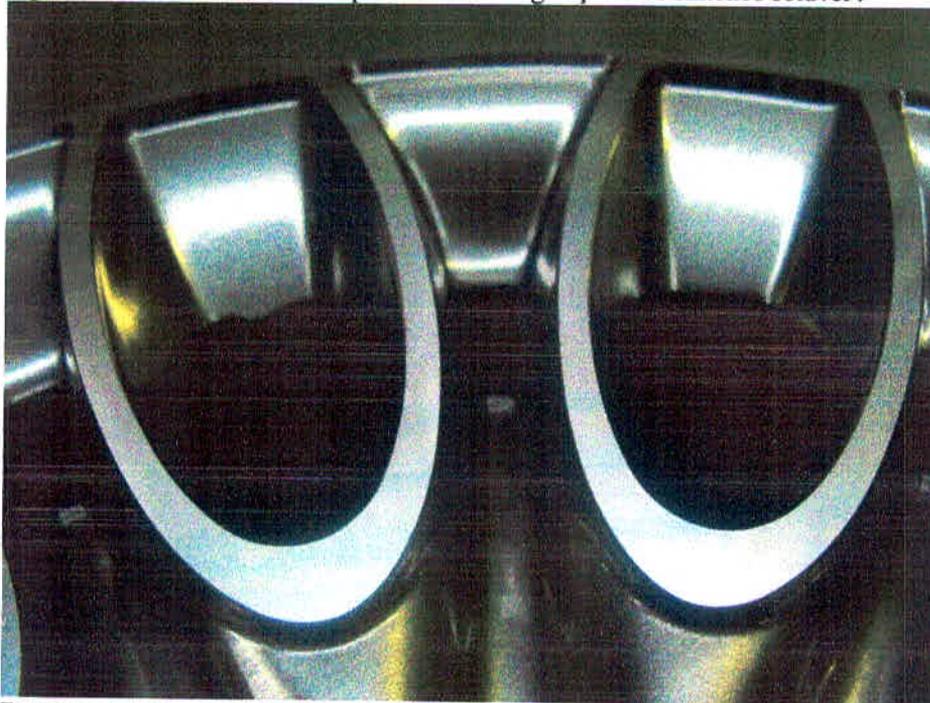
utilizados (ferramenta, porta ferramenta e inserto), utilizados neste processo, bem como a roda acabada (diamantada):

Figura 31: Torno de usinagem de diamantação de rodas - refrigeração óleo sintético.



Fonte: o autor.

Figura 32: Roda diamantada no processo de refrigeração óleo sintético solúvel .



Fonte: o autor.

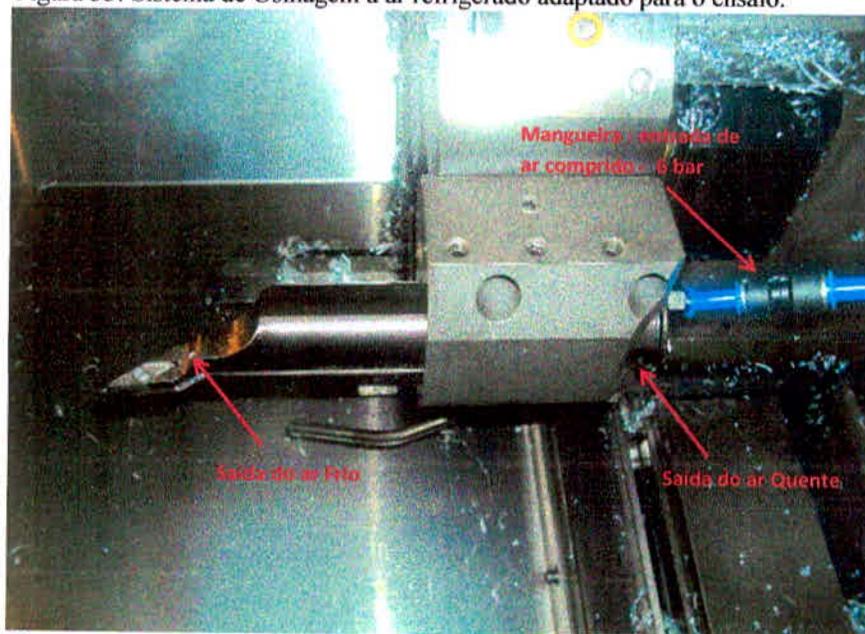
No processo atual podemos constatar a importância do coeficiente de viscosidade do óleo solúvel no que tange ao acabamento da peça durante o processo de usinagem de diamantação, bem como da alta rotação e rugosidade aparente, parâmetros estes que iremos confrontar com o resultado final o ensaio na usinagem a ar refrigerado.

### 8.2.3 Ensaio de usinagem de diamantação com refrigeração a fluido gasoso (ar comprimido refrigerado)

Para este ensaio o processo de usinagem é praticamente o mesmo, é removida a pintura e parte do material da roda, porém será utilizado como lubri-refrigerante durante a usinagem o sistema de ar comprimido refrigerado que é o tema do nosso estudo para a verificação da possibilidade de substituição do óleo sintético por este novo sistema visando o custo.

Para a realização dos testes foi necessário a adaptação de entrada na cabine do torno do ar comprimido através de uma mangueira com a devida especificação e padronizada para o tipo de atividade empregada e sua conexão com o porta-ferramenta, houve a necessidade também de adaptação do sistema de ar comprimido na unidade externa do torno, bem como sua configuração no programa da máquina para que no momento de “start” no início da usinagem a solenoide libere o ar na pressão padrão ideal (6 bar) de trabalho para o funcionamento correto do dispositivo Cold-air, onde este foi ajustado e fixado na placa do torno.

Figura 33: Sistema de Usinagem a ar refrigerado adaptado para o ensaio.

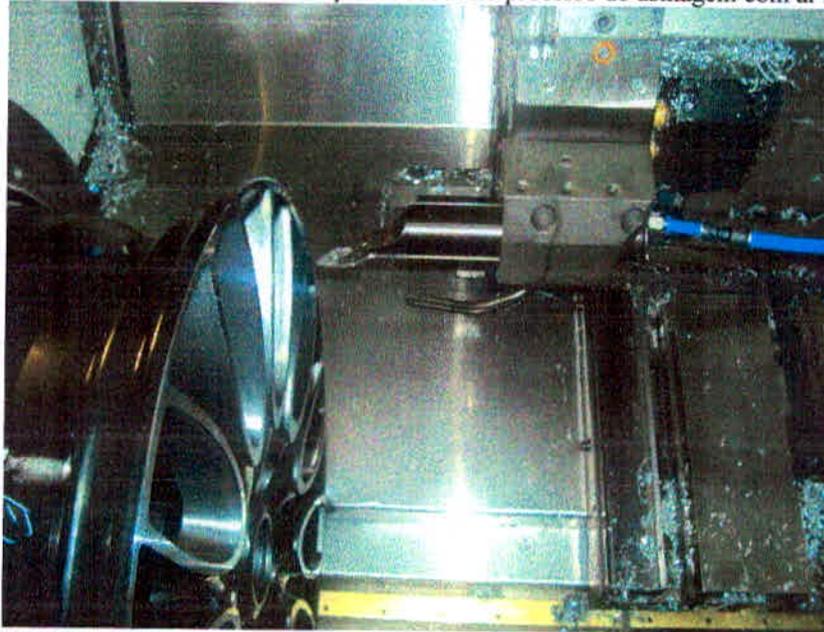


Fonte: o autor.

Prontos todos os ajustes necessários para o funcionamento do sistema de usinagem com ar comprimido refrigerado (fluido gasoso), fixamos a roda na placa do torno e iniciou-se a programação CNC do torno para a usinagem da mesma, lembrando que tanto para o ensaio

com refrigeração a óleo sintético bem como para o ensaio com ar comprimido refrigerado, foi utilizado o mesmo modelo de roda no processo de diamantação.

Figura 34: Ensaio de diamantação de rodas no processo de usinagem com ar refrigerado.



Fonte: o autor.

A análise dos resultados obtidos referente ao acabamento e visual das rodas usinadas neste processo foi de 85% de aceitação por parte dos profissionais da engenharia de processos e de 75% de aceitação por parte dos profissionais da qualidade durante as inspeções realizadas.

A imagem a seguir mostra que não houve muita diferença com relação ao visual e acabamento comparado com as rodas usinadas no processo atual.

Figura 35: Roda diamantada no processo de usinagem com ar refrigerado.



Fonte: o autor.

No entanto, algumas rodas durante o processo de usinagem sofreram riscos (arranhões) na superfície espelhada ocasionados pelo deslocamento do cavaco empurrado pela pressão do ar frio na saída do porta ferramenta, contudo na sua grande maioria o acabamento final ficou dentro dos parâmetros de aceitação. No que tange ao estado da pastilha ou inserto de PCD, o mesmo apresentou um aspecto mais escurecido nas zonas de cisalhamento primário e secundário, porém não gerou aresta postiça, tipo de avaria geradora de desgaste de ferramenta muito comum no de processo de usinagem com ar comprimido refrigerado ou não, como também no processo de usinagem a seco, ainda mais do alumínio.

Segundo dados fornecidos pela engenharia de processos, a temperatura de corte durante a usinagem do alumínio varia entre 97,5°C (370,5 K) a 185°C (458 K), dependendo do número de rotações ( $n$  (rpm)) ,bem como da velocidade de corte ( $V_c$  (m/min)), utilizados no processo de usinagem de rodas de alumínio. Se com 1750 rpm temos em torno de  $T = 91^\circ\text{C}$  (364 K), teremos então para  $T$  (diamant.) = 130°C (403 K).

Não foi possível coletar a temperatura de corte durante os testes tanto no processo de usinagem com óleo sintético bem como com a usinagem a ar comprimido refrigerado devido às condições de trabalho do torno e também da impossibilidade de se instalar um aparelho termopar tanto na roda como na pastilha de usinagem, porém, como sabemos que a rotação de usinagem de diamantação na máquina é de 2500 rpm e a velocidade de corte é de 3457 m/min e o perímetro da roda  $p = 440,2$  mm, concluímos que a temperatura de corte foi em torno de 130°C (403 K).

#### 8.2.4 Determinação experimental do coeficiente de Joule-Thomson para o ar

Medir e avaliar o coeficiente Joule-Thomson para ar atmosférico para pressão de entrada e de saída em um processo de estrangulamento.

Para um gás perfeito isto significa que  $t_1 = t_2$ . Para um gás real  $t_1 \neq t_2$ , salvo em certas faixas de temperatura e pressão. A variação de temperatura ( $t_1 - t_2$ ) em relação à variação de pressão se chama o efeito integral de Joule-Thomson para grandes diferenciais de pressão, e o coeficiente de Joule-Thomson ( $\mu_j$ ) para variações tendendo a zero.

Aproximando a derivada parcial da expressão que define  $\mu_j$ , calculamos da seguinte maneira:

$$\mu_j = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \approx \frac{T_1 - T_2}{P_1 - P_2} \quad ; \quad \text{onde:}$$

$$T_1 = 14,9^\circ\text{C} = 287,9 \text{ K (SI)}$$

$$T_2 = - 0,3^\circ\text{C} = 272,7 \text{ K (SI)}$$

$$P_1 = 6 \text{ bar} = 6 \text{ atm} = 6 \times 10^5 \text{ Pa (SI)}$$

$$P_2 = 2,5 \text{ bar} = 2,5 \text{ atm} = 2,5 \times 10^5 \text{ Pa (SI)}$$

Substituindo os valores na fórmula, temos:

$$\mu_j \cong (287,9 \text{ K} - 272,7 \text{ K}) / (6 \times 10^5 \text{ Pa} - 2,5 \times 10^5 \text{ Pa})$$

**$\mu_j \cong 4,343 \text{ K / Pa}$  ou  $4,343 \text{ }^\circ\text{C / atm}$  , portanto  $\mu_j > 0 \rightarrow$  Resfriamento**

Para o coeficiente de Joule-Thomson ( $\mu_j$ ) a unidade padrão recomendada é sempre em ( $^\circ\text{C / atm}$ ). Contudo, realizamos os cálculos em Pascal (Pa) e Kelvin (K) obedecendo o sistema internacional de medidas (SI), e respeitosamente ao “Lord Kelvin” (Thomson).

## 9 CONCLUSÃO

Podemos concluir que para nível de trabalho de pesquisa, o experimento obteve resultados reais na teoria como na prática com relação ao efeito de Joule e Thomson, contudo no que tange a sua atuação e utilização na usinagem com fluido gasoso no processo de diamantação de rodas verificou-se através das análises que os resultados referentes ao acabamento final da roda comparado com o processo de diamantação por lubri-Refrigeração (óleo sintético), foram bons, porém, deverão ser analisados com maior ponderação devido ao cavaco soprado pelo ar refrigerado estar riscando em alguns pontos o acabamento espelhado, com relação ao aquecimento da ferramenta constatou-se que a refrigeração por óleo sintético foi um pouco mais significativa, no entanto continuaremos com a pesquisa que é muito valiosa e poderá trazer retorno com baixo custo se tratando da substituição do óleo sintético para o ar refrigerado.

Para próximas ações estaremos implantando o processo de refrigeração MQL (mínima quantidade de lubri-Refrigerante) ou MQF (mínima quantidade de fluido) juntamente com o dispositivo de ar refrigerado (Cold-air), construiremos um novo sistema de alimentação conjunta no mesmo porta ferramenta. Como já comentado anteriormente a refrigeração MQL ou MQF é considerado por muitos pesquisadores como sendo um tipo de usinagem a seco, por muitas vezes nem molha o cavaco, peça e ferramenta. Neste processo utiliza-se a menor quantidade possível de fluido de corte que deve ser capaz de diminuir o coeficiente de atrito entre a peça e a ferramenta lubrificando-as. O óleo é pulverizado juntamente com ar comprimido próximo a zona de corte, devido ao baixo consumo de óleo ao mesmo tempo que o ar refrigerado estará atuando. Há a possibilidade de também utilizar-se o sistema de refrigeração criogênica, porém é sabido que este processo utiliza nitrogênio no estado líquido o que poderá inviabilizar o projeto devido ao alto custo desse processo.

A escolha correta do fluido de corte também é um fator de elevada importância, pois esta escolha, se realizada de maneira adequada, trará benefícios em relação à preservação da ferramenta de corte e diminuição do desgaste prematuro da mesma, o que conseguimos também neste experimento através da usinagem com ar comprimido refrigerado.

## REFERÊNCIAS

- ATKINS, P. W. **Físico-Química**. 6 ed. Rio de Janeiro: L. T. C. Editora S.A, 1999. v. 1. p 252.
- \_\_\_\_\_. **Físico-Química**. 6 ed. Rio de Janeiro: L. T. C. Editora S.A, 1999. v. 2. p 382.
- BRAGHINI JR., A. **Metodologia para escolha de fluidos de corte não agressivos ao meio ambiente para aplicações em usinagem de metais**. 2002. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos - USP. São Carlos/SP, 2002.
- CASTROL BRASIL LTDA. Assistência Técnica da Castrol Brasil Ltda. **Revista O Mundo da Usinagem**. 2003.
- CATAI, R. E.; BIANCHI, E. C. Política sobre utilização e descarte de fluidos de corte. Mar. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, 2006.
- CERATIZIT. Disponível em: <[www.ceratizit.com.br](http://www.ceratizit.com.br)>. Acesso em: 10 Mar. 2013.
- CHILDS, T. H. C.; MAEKAWA, K.; MALUK, P. **Effects of coolant on temperature distribution in metalmachining**. Materials Science and Technology. v.4, n.11, p.1006-1019, 1988.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6 ed. São Paulo: Artliber, 2008.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.
- GHANI, J. A.; CHOUDHURY, I. A.; MASJUKI, H. H. Wear mechanism of TiN coated carbide and uncoated cermet tools at high cutting speed applications. **Journal of Materials Processing Technology**, 2004, n. 153-154, p. 1067-1073.
- HONG, S. Y.; DING, Y. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2001, n.41, p. 1417-1437.
- ISO 3685. Tool-life testing with single-point turning tools. **International Organization for Standardization**, Geneva, Switzerland, 1993.
- JAYAL, A. D.; BALAJI, A. K. **Effects of cutting fluid application on tool wear in machining-Interactions with tool-coatings and tool surface features**. Wear, n. 99233, p. 1-8, 2009.
- MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.
- MANGELS, Engenharia de Processos Mangels. **Manual interno - Usinagem de Rodas**. Três Corações/MG, 2001.

MITSUBISHI CAR BIDE, [2013]. Disponível em: <[www.mitsubishicarbide.com](http://www.mitsubishicarbide.com)>. Acesso em: 5 Jul. 2013.

MOOK, W. K.; SHAHABI, H. H.; RATNAM, M. M. Measurement of nose radius wear in turning tools from a single 2D image using machine vision. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2009, n. 43, p. 217-225.

NEW WORLD ENCYCLOPEDIA. [2013]. Disponível em: <[www.newworldencyclopedia.org](http://www.newworldencyclopedia.org)> Acesso em: 25 Mai. 2013.

NOORDIN, M. Y.; VENKATESH, V. C.; SHARIF, S. Dry turning of tempered martensitic stainless tool steel using coated cermet and coated carbide tools. **Journal of Materials Processing Technology**, 2007, n. 185, p. 83-90.

NOUARI M., LIST G., GEHIN D., GOMEZ B., MANAUD J., **Wear behaviour of cemented carbide tools em dry machining of aluminum alloy**. França, 2003.

NOVASKI, O.; DÖRR, J. **Usinagem sem refrigeração**. Máquinas e Metais. n. 398, p. 18-27, 1999.

PUMA CLASSIC, [2013]. Disponível em: <[www.pumaclassic.com.br](http://www.pumaclassic.com.br)>. Acesso em: 10 Abr. 2013.

SISTEMA FIERGS, [2013]. Disponível em: < [www.app.sistemafiergs.org.br](http://www.app.sistemafiergs.org.br) >. Acesso em: 05 Abr. 2013.

SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. Dry machining - Machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, 2000, n. 101, p. 287-291.

STEPHENSON, D. A.; JEN, T. C.; LAVINE, A. S. Cutting tool temperatures in contourturning: transient analysis and experimental verification. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 1997, v.119, n.4 (a), p. 494-501.

TOOLTECH. Disponível em: <[www.tooltechmg.com.br](http://www.tooltechmg.com.br)>. Acesso em: 5 Jul. 2013.

WANG, Z. Y.; RAJURKAR, K. P. **Cryogenic machining of hard-to-cut materials**. Wear, n. 239, p.168-175, 2000.

WEIGAERTNER, W. L.; SCHROETER. R. B. **Tecnologia da Usinagem do Alumínio e suas ligas**. Alcan alumínio do Brasil S.A. São Paulo: [s.n], 1990.

YILDIZ, Y.; NALBANT, M. A review of cryogenic cooling in machining processes. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2008, n.48, p. 947-964.