

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS**  
**Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica**

**José Dias Pena**

**FURAÇÃO DE LIGA DE ALUMÍNIO COM FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO E  
METAL DURO. UMA CORRELAÇÃO ENTRE O EFEITO DA ARESTA POSTIÇA  
DE CORTE E SUA INFLUÊNCIA NA RUGOSIDADE**

**Belo Horizonte**  
**2014**

**José Dias Pena**

**FURAÇÃO DE LIGA DE ALUMÍNIO COM FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO E METAL DURO. UMA CORRELAÇÃO ENTRE O EFEITO DA ARESTA POSTIÇA DE CORTE E SUA INFLUÊNCIA NA RUGOSIDADE**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica.**

**Orientador Dr. William de Melo Silva**

**Belo Horizonte  
2014**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

P397f Pena, José Dias  
Furação de liga de alumínio com ferramentas de aço rápido e metal duro: uma correlação entre o efeito da aresta postiça de corte e sua influência na rugosidade / José Dias Pena. Belo Horizonte, 2014.  
118.:il.

Orientador: William de Melo Silva  
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Ligas de alumínio. 2. Metais duros. 3. Aspereza de superfície. 4. Usinagem. 5. Desgaste mecânico. 6. Furadeiras. I. Silva, William de Melo. II. Pontifícia Universidade Católica de Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 621.914.2

**José Dias Pena**

**FURAÇÃO DE LIGA DE ALUMÍNIO COM FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO E METAL DURO. UMA CORRELAÇÃO ENTRE O EFEITO DA ARESTA POSTIÇA DE CORTE E SUA INFLUÊNCIA NA RUGOSIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica.

---

**Dr. William de Melo Silva (Orientador) - PUC Minas**

---

**Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro**

---

**Dr. Claudinei José de Oliveira**

---

**Dr. Hermano Nascimento Junior**

**Belo Horizonte, 30 de maio de 2014.**

A minha família, em especial à minha eterna  
companheira e amiga, Marlene, e às minhas filhas  
Mayra e Sarah, Bruno, Arthur e a minha neta Júlia.

## **AGRADECIMENTOS**

***Agradeço a Deus pelo ensinamento e paz espiritual para concluir essa tarefa.***

***Ao Prof. Dr. William de Melo Silva, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.***

***Ao Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro, e em especial à secretária Valéria.***

***Ao Sr. Carlos Eduardo dos Santos, Ítalo Bruno dos Santos e Fernanda Maria de Paula Miranda que me auxiliaram nos testes de laboratório de usinagem.***

***Ao Sr. Paulo Sérgio Martins da FPT Powertrain, pelo apoio nesta dissertação.***

***Em especial a minha família que sempre esteve ao meu lado e todas as pessoas que contribuíram e apoiaram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.***

**“Se você falar com um homem numa  
linguagem que ele compreende, isso entra na cabeça dele. Se você falar com  
ele em sua própria linguagem,  
você atinge seu coração.”**

**Nelson Mandela**

## RESUMO

Nas últimas décadas, as ligas de alumínio têm sido uma alternativa para a substituição de aços devido à possibilidade de se reduzir peso em veículos. Este trabalho experimental tem como objetivo verificar o comportamento das ferramentas de furação e suas interferências na qualidade de peças produzidas em uma liga de alumínio SAE 323. Para isso, foram selecionadas algumas ferramentas de aço rápido e de metal duro disponíveis no mercado para a execução de um estudo comparativo sobre o desgaste de cada ferramenta. Além disso, foram determinados inter rompimentos no processo de furação para a análise da rugosidade, cilindridade e circularidade dos furos produzidos em blocos de controle, no estado fundido, a cada cento e doze furos. Como resultado esperado, verificou-se que a ferramenta de metal duro com revestimento de Nitreto de Titânio-Alumínio, na condição de lubrificação normal, foi a que manteve as menores dispersões de medidas de cilindridade conciliada à uma baixa rugosidade. Por fim, observou-se através de microscopia eletrônica de varredura a condição da melhor ferramenta após 448 furos, onde foi constatado o elevado desgaste na aresta de corte principal, causado principalmente pela formação da aresta postiça de corte, presente desde o primeiro furo, além de pequenas trincas possivelmente devido ao aumento de pressão de corte e temperatura.

Palavras-chave: Furação. Ferramenta. Desgaste. Cilindridade e Rugosidade.

## **ABSTRACT**

In the last decades, the aluminum alloys have been used as an alternative for a substitution of steel due to the possibility of reducing weight in automobile. The goal of this experimental work is to verify the behavior of the drilling tools and the influence in the quality of the produced SAE 323 aluminium pieces. For this, it has been selected high speed steel and carbide metal tools presents in the market to a comparative study about the wear of each tool. Moreover, It was designed the break up in the experimental drilling process for the cilindricity, roughness and roundness analyses in the workpiece after 112 holes produced. As expected result, it was verified that the carbide metal tool with TiNAl coating, in the standard lubrication pressure showed the best measurements of cilindricity deviation with low roughness. It was observed by scanning electron microscope the condition of the best tool after 448 holes, in which the high wear of the main cutting edge caused by the formation of built up edge, present since the first hole, and small cracks possibly due to increased pressure of cutting and high temperature.

Keywords: Drilling. Tool. Wear. Cilindricity and Roughness.

## LISTADE FIGURAS

FIGURA 1 - Processo de furação, mostrando a peça, a broca e os movimentos de corte e avanço.....	37
FIGURA 2 - Planos de referência em uma ferramenta de corte.....	40
FIGURA 3 - Revestimento por deposição de íons.....	53
FIGURA 4 - Desenho esquemático que representa a espessura e a quantidade de camadas de um revestimento de ALOX 400.....	54
FIGURA 5 - Desenho esquemático que mostra a seção transversal de ALOX 400..	54
FIGURA 6a - Broca revestida de diamante após 2000 furos .....	61
FIGURA 6b - Broca revestida de diamante após 3080 furos .....	61
FIGURA 6c - Broca revestida de diamante após 9216 furos.....	61
FIGURA 7 - Desenho técnico que representa as arestas e as superfícies de uma broca helicoidal .....	64
FIGURA 8 - Conceitos básicos na avaliação de superfícies .....	66
FIGURA 9 - Parâmetro Rz.....	67
FIGURA 10 - Parâmetro Rt .....	67
FIGURA 11 - Representação da circularidade .....	68
FIGURA 12 - Representação de cilindridade.....	69
FIGURA 13 - Dispositivo para fixação das brocas no microscópio .....	71
FIGURA 14 - Aresta Postiça de corte Broca MD/TiN após 448 furos.....	80
FIGURA 15 - Equipamento de medição do batimento posteriormente à montagem dos sistemas hidráulico e térmico. ....	81
FIGURA 16 - Broca HSS sem refrigeração .....	82
FIGURA 17 - Imagens da ferramenta de metal duro com revestimento de TiNAl.....	83

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - Resultado das brocas revestidas .....	56
GRÁFICO 2 - Desempenho das brocas revestidas e não revestidas na furação com refrigeração .....	60
GRÁFICO 3 - Diâmetro do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de aço rápido sem revestimento .....	84
GRÁFICO 4 - Diâmetro do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro sem revestimento .....	84
GRÁFICO 5 - Diâmetro do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiN .....	85
GRÁFICO 6 - Diâmetro do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiNAl .....	85
GRÁFICO 7 - Circularidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de aço rápido sem Revestimento.....	86
GRÁFICO 8 - Circularidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro sem Revestimento.....	87
GRÁFICO 9 - Circularidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiN .....	87
GRÁFICO 10- Circularidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiNAl .....	88
GRÁFICO 11- Cilindricidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de aço rápido sem revestimento .....	89
GRÁFICO 12 - Cilindricidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de aço rápido sem revestimento .....	89
GRÁFICO 13 - Cilindricidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiN .....	90
GRÁFICO 14 - Cilindricidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiNAl .....	91
GRÁFICO 15 - Rugosidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de aço rápido sem revestimento .....	92
GRÁFICO 16 - Rugosidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de MD sem revestimento .....	93
GRÁFICO 17 - Rugosidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiN .....	94

GRÁFICO 18 - Rugosidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiNAl. ....	94
GRÁFICO 19 - Dispersão do diâmetro do furo em função do número de furos produzidos com refrigeração QNF .....	95
GRÁFICO 20 - Dispersão da circularidade em função do número de furos produzidos com refrigeração QNF.....	95
GRÁFICO 21 - Dispersão da cilindridade em função do número de furos produzidos com refrigeração QNF. ....	96
GRÁFICO 22 - Dispersão da rugosidade em função do número de furos produzidos com refrigeração QNF.....	96
GRÁFICO 23 - Dispersão do diâmetro em função do número de furos produzidos com refrigeração MQF. ....	97
GRÁFICO 24 - Dispersão da circularidade em função do número de furos produzidos com refrigeração MQF. ....	97
GRÁFICO 25 - Dispersão da circularidade em função do número de furos produzidos com refrigeração MQF. ....	98
GRÁFICO 26 - Dispersão da rugosidade em função do número de furos produzidos com refrigeração MQF. ....	99
GRÁFICO 27 - Dispersão do diâmetro em função do número de furos produzidos sem refrigeração. ....	99
GRÁFICO 28 - Dispersão da circularidade em função do número de furos produzidos sem refrigeração. ....	100
GRÁFICO 29 - Dispersão da cilindridade em função do número de furos produzidos sem refrigeração.....	100
GRÁFICO 30 - Dispersão da rugosidade em função do número de furos produzidos sem refrigeração. ....	101

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Características Mecânicas da Liga de Alumínio SAE 323 / A 380.....	45
TABELA 2 - Características adicionais da Liga de Alumínio SAE 323 / A 380.....	46
TABELA 3 - Tipo de camada de revestimento .....	55
TABELA 4 - Brocas HSS, Metal Duro sem revestimento e com revestimento de TiN e TiAlN .....	75
TABELA 5 - Composição Química da Liga de Alumínio SAE 323 / A 380 .....	77
TABELA 6 - Medidas da aresta postiça de corte em $\mu\text{m}$ .....	79

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

FOTO 1 - Cada uma das posições que foram fotografadas as brocas .....	72
FOTO 2 - Microscópio de medição Mitutoyo com lente de aumento de 30 vezes com resolução milesimal .....	72
FOTO 3 - Rugosímetro Taylor Hobson .....	73
FOTO 4 - Máquina Tridimensional Mitutoyo .....	74
FOTO 5 - Máquina CNC .....	76
FOTO 6 - Placa de alumínio .....	77
FOTO 7 - Corpo de prova .....	78

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas

A<sub>γ</sub> - Superfície de saída

Al - Alumínio

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Óxido de alumínio (alumina)

APC - Aresta Postiça de Corte

BTU - British Thermal Unit British

Co - Cobalto

Cr - Cromo

Cu - Cobre

CVD - Deposição química de vapor

DIN - Deutsches Institut für Normung

f - Avanço por rotação mm/rev

Fe - Ferro

HB - Brinell

HSS - Aço Rápido

KL - Deslocamento do gume no sentido da face

KM - Profundidade da cratera

KT - Largura do lábio da cratera

MG - Magnésio

Mn - Manganês

MQF - Mínima Quantidade de Fluido

NC - Centro Numérico

Pf - Plano admitido de trabalho

Pfe - Plano de trabalho efetivo

Po - Plano ortogonal ou de medida da ferramenta

Poe - Plano ortogonal ou de medida efetivo

Pr - Plano de referência da Ferramenta

Ps - Plano de corte da ferramenta

Pse - Plano de corte efetivo

PVD - Deposição física de vapor

QNF - Quantidade Normal de Fluido

Ra - Rugosidade média (μm)

Rt - Altura máxima de rugosidade

Rz - Média dos cinco maiores picos e maiores vales de um perfil

S - Aresta Principal de corte

S` - Aresta secundária de Corte

Si - Silício

SPD - Afastamento médio da região mais profunda da cratera Deformação Plástica Severa

SVy - Ângulo de incidência

Ti - Titânio

TiAlN - Nitreto de titânio e alumínio

TiN - Nitreto de titânio

U - Sentido de rotação

VB - Largura média do desgaste do flanco (mm)

VC - Velocidade de corte (m/min)

Ve - Movimento Efetivo

Vf - Movimento de avanço

Y - Ângulo de saída

Z - Altura máxima das rugosidades medidas no comprimento da amostragem

Zn - Zinco

$\alpha$  - Ângulo Lateral de Folga

$\varphi$  - Ângulo de direção de avanço

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>33</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>34</b>
<b>1.1.1 Objetivo geral .....</b>	<b>34</b>
<b>1.1.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>34</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>35</b>
<b>2.1 Processo de furação .....</b>	<b>35</b>
<b>2.1.1 Movimentos que causam diretamente a saída do cavaco.....</b>	<b>36</b>
<b>2.1.2 Movimentos que não tomam parte direta na formação do cavaco.....</b>	<b>37</b>
<b>2.1.3 Nomenclatura e geometria das ferramentas de corte.....</b>	<b>38</b>
<b>2.1.4 Planos do sistema de referência.....</b>	<b>39</b>
<b>2.1.5 Formação do cavaco.....</b>	<b>40</b>
<b>2.2 Alumínio .....</b>	<b>41</b>
<b>2.2.1 Propriedades mecânicas das ligas de alumínio .....</b>	<b>43</b>
<b>2.3 Materiais para ferramentas de corte.....</b>	<b>46</b>
<b>2.3.1 Divisão dos materiais para ferramentas de corte.....</b>	<b>48</b>
<b>2.3.1.1 Aço rápido .....</b>	<b>48</b>
<b>2.3.1.2 Metal duro .....</b>	<b>48</b>
<b>2.3.1.3 Material cerâmico .....</b>	<b>49</b>
<b>2.3.1.4 Diamante .....</b>	<b>50</b>
<b>2.3.2 Revestimentos de ferramentas .....</b>	<b>50</b>
<b>2.3.3 Revestimento de TiAlN e TiN.....</b>	<b>51</b>
<b>2.3.4 Revestimento de TiAlN e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e multicamadas pelo processo de CVD e PVD.....</b>	<b>52</b>
<b>2.3.5 Revestimento de TiN, TiAlN e ALOX pelo processo de PVD.....</b>	<b>54</b>
<b>2.3.6 Fluidos de corte.....</b>	<b>56</b>
<b>2.3.6.1 Processo de furação a seco .....</b>	<b>58</b>
<b>2.3.7 Desgaste de ferramentas.....</b>	<b>58</b>
<b>2.4 Influência dos parâmetros de corte no consumo de energia elétrica .....</b>	<b>61</b>
<b>2.4.1 Brocas .....</b>	<b>62</b>
<b>2.4.2 Geometria das brocas.....</b>	<b>63</b>
<b>2.5 Parâmetros dimensionais.....</b>	<b>64</b>
<b>2.5.1 Rugosidade.....</b>	<b>64</b>
<b>2.5.2 Circularidade .....</b>	<b>67</b>
<b>2.5.3 Análise de forma .....</b>	<b>68</b>
<b>2.5.4 Cilindricidade.....</b>	<b>68</b>
<b>3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>70</b>
<b>3.1 Fluxograma do processo.....</b>	<b>70</b>
<b>3.2 Método utilizado na obtenção de imagens das brocas.....</b>	<b>71</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>77</b>
<b>4.1 Parâmetros Geométricos.....</b>	<b>78</b>
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>102</b>
<b>5 TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>103</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO A - Certificado de Calibração da máquina ZEISS 0065 e 066.....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXO B - Certificado de Calibração da máquina ZEISS 148.....</b>	<b>115</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um material utilizado em grande escala na indústria automotiva, na fabricação de blocos de motores, caixas de transmissão e corpos de válvulas, com a finalidade de reduzir o peso do veículo, para melhorar a economia de combustível e as emissões de gases. A maioria destes componentes tem tolerâncias precisas e/ou furos roscados que necessitam de operações de acabamento de usinagem, tais como furação, fresagem e/ou torneamento. Estas operações têm, em média, 30% do tempo total de usinagem e chegam a gerar 70% de aparas. Posteriormente a essas operações, o acabamento é fino sem necessidade de operações de retífica ou polimento. As forças de corte e taxa de desgaste da ferramenta de corte são baixas devido à boa condução de calor da liga Al-Si (COTTERELL; KELLY, 2002).

Furação é um processo de usinagem utilizado para obtenção de superfície cilíndrica interna, sendo esta coaxial ao eixo de rotação do movimento de corte, considerado como de desbaste, semi-acabamento ou acabamento. A furação de ligas Al-Si apresentam dificuldades devido adesão do alumínio à broca. A qualidade de um furo do processo é determinada por uma síntese dos erros devido à dinâmica do processo e, também, ao regime térmico na interface peça/broca. Os mecanismos que induzem estes erros incluem: desvios ou rotação anormal da broca na entrada; deflexões da broca devido às forças desbalanceadas; erros devido à falha de processo; erros devido ao corte nas bordas da broca; erros devido à expansão térmica da broca e da peça. A rigidez da broca determina, em grande parte, os erros induzidos devido aos mecanismos dinâmicos, mas não é afetada pela presença ou ausência do revestimento da broca (KALIDAS; DEVOR; KAPOOR, 2001).

Atualmente, essas operações são realizadas em condições lubrificadas, onde a zona de trabalho da máquina é inundada com grandes quantidades de fluidos de usinagem. Os fluidos de usinagem têm a função de resfriar e lubrificar a peça e facilitar a remoção do cavaco da ferramenta e também têm a função de minimizar a adesão do alumínio na ferramenta e ajudar a conseguir um bom acabamento final da peça.

Neste estudo, pretende-se fazer um levantamento de dados experimentais que indiquem a correlação entre a evolução do desgaste de ferramentas no processo de furação de uma liga comercial de alumínio. Para tanto, é apresentado

uma fundamentação sobre o processo de furação e das ligas de alumínio, uma avaliação dos parâmetros dimensionais e a metodologia que será seguida.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Analisar o desempenho dos diferentes tipos de brocas com sistemas de fixação hidráulico utilizados no processo de furação e suas interferências na qualidade de peças produzidas em uma liga de alumínio SAE 323.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- a) Analisar o comportamento das brocas de aço rápido, metal duro sem revestimento, metal duro com revestimento de TiN e metal duro com revestimento de TiAlN no processo de furação em uma liga de alumínio SAE 323, com a utilização de fluido refrigerante em três situações de lubrificação: com refrigeração QNF, com refrigeração MQF e a seco;
- b) Avaliar erros de forma dos furos usinados quanto à cilíndricidade, circularidade, dimensional e rugosidade.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Processo de furação

A furação é um processo de usinagem que tem por objetivo a geração de furos, na maioria das vezes cilíndricos, em uma peça, através do movimento relativo de rotação entre a peça e a ferramenta, denominada broca. A continuidade da retirada de material é garantida pelo movimento relativo de avanço entre a peça e a ferramenta, que ocorre segundo uma trajetória coincidente ou paralela ao eixo longitudinal da ferramenta, sendo assim, ela constitui-se num dos processos de usinagem mais importantes que têm sido amplamente aplicadas na área de fabricação. Para realizar as operações de furação, são empregadas ferramentas multicortantes conhecidas como brocas (FERRARESI, 1970).

Existem diversos tipos de brocas, portanto, estas ferramentas são fabricadas com materiais, dimensões e geometrias distintas (NAYEBI; VAGHEFPOUR, 2008). A operação de furação ocorre por meio da combinação dos movimentos de avanço e rotação da peça ou broca (KOLE *et al.*, 1997). A extremidade da broca com arestas de corte penetra a superfície da peça, removendo cavacos e produzindo um furo cilíndrico (WALKER, 2004).

No instante do corte, isto é, quando os cavacos são removidos da peça, o local de usinagem alcança altas temperaturas, isto ocorre devido ao atrito entre a broca e a peça (OKASHA; MATIVENGA; DRIVER, 2010)

As altas temperaturas no corte moderno de metal constitui-se na causa de vida útil da ferramenta de corte insatisfatório e as limitações de velocidade de corte. Portanto, os parâmetros mais apropriados de furação devem ser selecionados. A ferramenta de furação tem de suportar altas temperaturas, que incluem forças de atrito e de grandes cargas mecânicas e térmicas na furação a seco.

Conforme Bağcı e Ozcelik (2006), um dos fatores essenciais em processos de usinagem é o desgaste da ferramenta e isto está relacionado com a temperatura existente nas superfícies de desgaste da ferramenta. A investigação do processo de corte, em relação ao efeito térmico, aumentou de importância, graças à obtenção de altos níveis de velocidade de corte em material moderno nas operações de remoção de cavaco.

Com o recente aumento na demanda de energia e as restrições nas emissões de carbono, a economia de energia tornou-se uma prioridade para a indústria de transformação. Crescentes exigências ambientais de órgãos governamentais e clientes vêm salientar a importância das empresas em melhorar o seu desempenho ambiental. Desse modo, os preços da energia registraram um aumento acentuado e trouxe o custo da energia para a agenda de fabricação nas empresas. A economia de energia é de 6 até 40% que pode ser obtido a partir da escolha ótima de parâmetros de corte e ótimas design ferramentas.

Em processos de usinagem, o critério mais usado é a taxa de remoção de material, rugosidade superficial, força de corte, a vida da ferramenta e consumo de energia, que tem sido utilizado a partir do início das pesquisas neste ramo. No entanto, a única abordagem objetiva tem um valor limitado para corrigir os parâmetros de corte ideal. Daí, abordagens multi-objetivas que consideram vários objetivos diferentes e contraditórias foram relatados em otimização de parâmetros de corte.

Rugosidade superficial e desgaste de flanco foram adotados como objetivos a otimizar os parâmetros de fresamento de liga de alumínio para fresas (TSAO, 2009).

Os movimentos no processo de usinagem acontecem entre a peça e a aresta cortante.

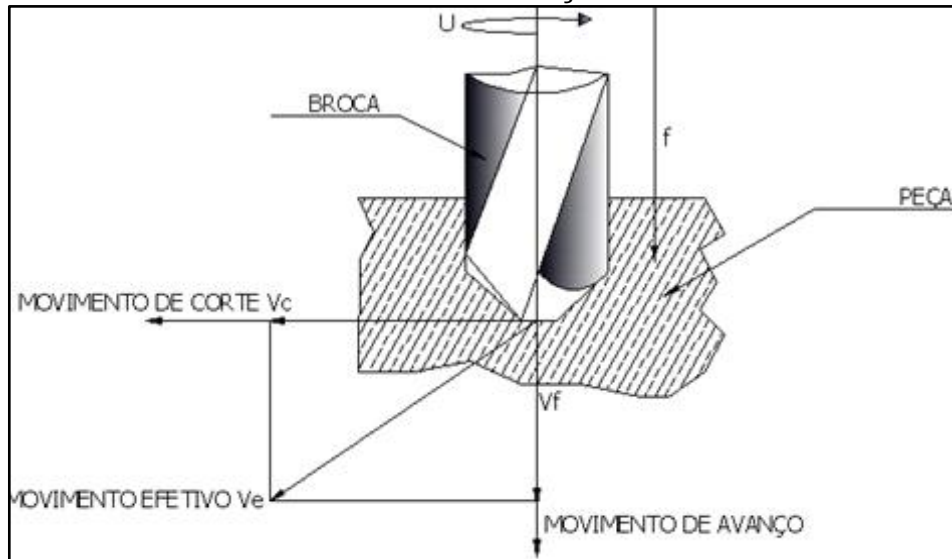
Deve-se distinguir dois tipos de movimentos, os que ocasionam diretamente a saída do cavaco e os movimentos que não tomam parte diretamente na retirada do cavaco.

### **2.1.1 Movimentos que causam diretamente a saída do cavaco**

- a) Movimento de corte
  - ✓ é o movimento entre a peça e a ferramenta, o qual sem o movimento de avanço origina somente uma única retirada de cavaco;
- b) Movimento de avanço
  - ✓ é o movimento entre a peça e a ferramenta, o qual junto com o movimento de corte origina a retirada contínua do cavaco;
- c) Movimento efetivo
  - ✓ é o movimento resultante dos movimentos de corte e avanço, realizados ao mesmo tempo. (FERRARESI, 1970).

A Figura 1 apresenta os movimentos de corte, de avanço e efetivo durante a furação.

**Figura 1 - Processo de furação, mostrando a peça, a broca e os movimentos de corte e avanço**



Fonte: NOVASKI, 1996.

### 2.1.2 Movimentos que não tomam parte direta na formação do cavaco

Os respectivos deslocamentos, a seguir, não contribuem na produção de cavaco, são eles:

- a) Movimento de aproximação:
  - ✓ é o movimento entre a peça e a ferramenta, com a qual a ferramenta é aproximada da peça antes da usinagem;
- b) Movimento de ajuste:
  - ✓ é o movimento entre a peça e a ferramenta para se determinar a espessura de material a ser retirada;
- c) Movimento de correção:
  - ✓ é o movimento de correção entre a peça e a ferramenta para compensar o desgaste da ferramenta, ou qualquer outro tipo de variação;
- d) Movimento de recuo:
  - ✓ é o movimento entre a aresta de corte e a peça, após a usinagem, para afastar a ferramenta. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2005; FERRARESI, 1970),

### 2.1.3 Nomenclatura e geometria das ferramentas de corte

A geometria da ferramenta de corte afeta diretamente, com outros fatores, na usinagem dos metais. A seguir são apresentadas as geometrias necessárias para o bom desempenho em usinagem:

- a) Cunha de corte:
  - ✓ é formada pelas superfícies de saída e de folga da ferramenta. Pelo movimento relativo entre a peça e a ferramenta, os cavacos são formados sobre a cunha de corte;
- b) Superfície de saída  $A\gamma$ :
  - ✓ superfície da cunha de corte por onde o cavaco se desliza;
- c) Superfície de folga:
  - ✓ é a superfície da cunha de corte, que determina a folga entre a ferramenta e a superfície de usinagem. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2005; FERRARESI, 1970).

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2005) e Ferraresi, (1970):

- a) Aresta principal de corte  $S$ :
  - ✓ é a aresta onde a cunha de corte é observada no plano de trabalho, indica a direção de avanço, formando um ângulo de avanço  $\varphi = 90^\circ$ ;
- b) Aresta secundária de corte  $S'$ :
  - ✓ é a aresta de corte onde a cunha de corte, quando observada no plano de trabalho, e para o ângulo da direção de avanço  $\varphi = 90^\circ$ , indica a direção de avanço contrária a direção de avanço;
- c) Ponta de corte:
  - ✓ é a parte da cunha de onde se encontram as arestas principal e secundária de corte;
- d) Ponto de corte escolhido:
  - ✓ é o ponto destinado à determinação das superfícies e ângulos de cunha de corte.

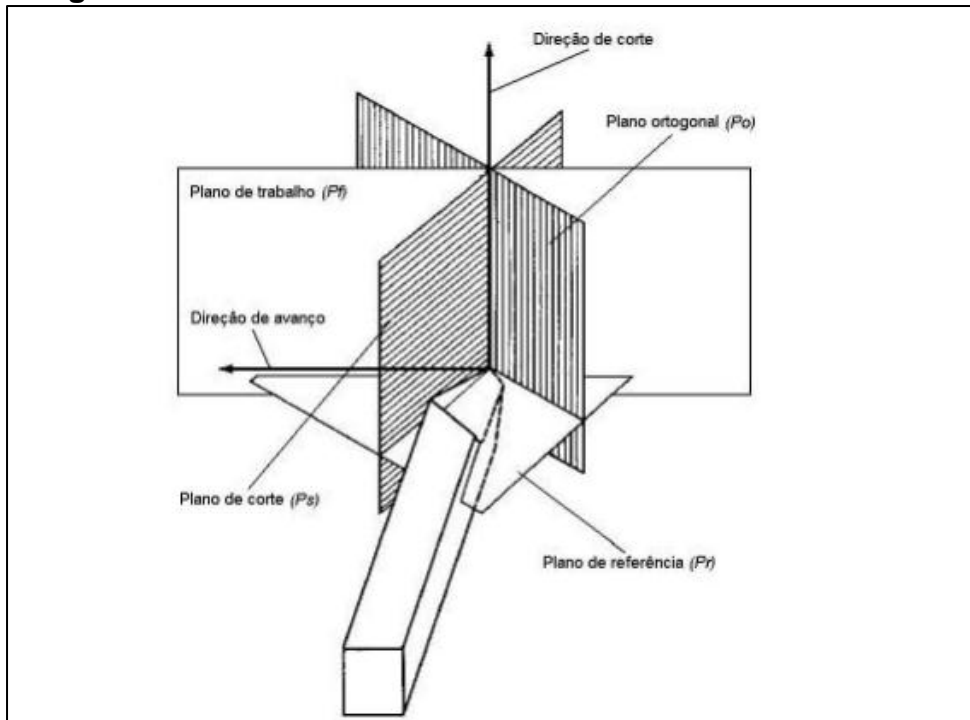
### 2.1.4 Planos do sistema de referência

Segundo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2005; FERRARESI, 1970), os planos de referências são:

- a) plano de referência da ferramenta-  $P_r$ :
  - ✓ é o plano que passando pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular à direção admitida de corte. Ela é escolhida de maneira que o plano de referência da ferramenta seja o mais paralelo possível ou perpendicular a uma superfície ou eixo da ferramenta;
- b) plano de corte da ferramenta -  $P_s$ :
  - ✓ plano que passando pelo ponto de corte escolhido, é tangente à aresta de corte e perpendicular ao plano de referência da ferramenta;
- c) plano de corte Efetivo -  $P_{se}$ :
  - ✓ é o plano que passando pelo ponto de corte escolhido, é tangente à aresta de corte e perpendicular ao plano de referência efetivo  $P_{re}$ ;
- d) plano ortogonal ou de medida da ferramenta -  $P_o$ :
  - ✓ é o plano que passando pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular aos planos de referência e de corte da ferramenta;
- e) plano ortogonal ou de medida efetivo -  $P_{oe}$ :
  - ✓ é o plano que passando pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular aos planos de referência e de corte da ferramenta;
- f) plano admitido de trabalho -  $P_f$ :
  - ✓ é o plano que passando pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular ao plano de referência e paralelo à direção admitida de avanço;
- g) plano de trabalho efetivo -  $P_{fe}$ :
  - ✓ é o plano que passando pelo ponto de corte escolhido, contém as direções de corte e de avanço.

A Figura 2 mostra os planos de referência em uma ferramenta de corte.

**Figura 2 - Planos de referência em uma ferramenta de corte**



Fonte: FERRARESI, 1970.

### **2.1.5 Formação do cavaco**

Durante o processo de corte, a ferramenta remove uma parte da peça por um processo de deformação plástica dentro das zonas de cisalhamento primário e secundário. (LISTA *et al.*, 2005).

Na operação de furação, cavacos pequenos e bem quebrados são desejáveis. Isto porque, como os cavacos ficam maiores, eles não podem mover-se facilmente através dos canais de saídas, o que aumenta requisitos de torque, podendo causar a quebra da broca.

Isso implica que, durante a furação, os cavacos giram com a broca e impactam a parede do furo ou interior do canal de saída da broca. Este impacto produz um momento de flexão no cavaco. Este momento de flexão deforma o cavaco e posteriormente provoca a sua fratura. (BATZER *et al.*, 1998).

A parte de trás do cavaco é rugosa tendo em vista que a sua formação não é homogênea, em função da presença de pontos de baixa resistência ou de concentração de tensão que está presente no metal o qual está sendo usinado.

Portanto, a formação do cavaco influencia diretamente na usinagem, originando o desgaste da ferramenta, esforços de corte e maior calor gerado.

Nesse conjunto de informações, ressalta-se que a retirada da ferramenta quebrada de dentro do furo é um processo difícil e oneroso. Em um processo produtivo de alta escala, isso pode representar uma perda grave, pois além da perda da peça, pode indicar também a troca da broca e o *setup* da máquina.

## 2.2 Alumínio

O alumínio puro e ligas de alumínio desempenham um papel chave na engenharia moderna, uma vez que são os materiais não ferrosos mais utilizados. Eles são amplamente empregados na indústria automotiva, aeroespacial, e engenharia de construção, devido à boa resistência à corrosão, propriedades mecânicas superiores, juntamente com boa capacidade de usinabilidade, soldabilidade, e custo relativamente baixo. (TOTTEN; MACKENZIE, 2003; POLMEAR, 1995).

No entanto, recentemente, são realizadas pesquisas, para uma melhor compreensão do esforço e propriedades aplicadas quanto à manipulação dos processos de refinamento de grão que permitem melhorar as suas qualidades mecânicas e funcionais (ESTRIN *et al.*, 2010; WITKIN; LAVERNIA, 2006).

Comercialmente, o alumínio puro (conhecido como 2 S) e as ligas conhecidas com 3 S, 52 S e 56 S são extremamente dúcteis. Embora as precisões específicas de corte sejam baixas, o grau de usinagem é baixo.

As ligas mais resistentes conhecidas como 14 ST, 17 ST e 24 ST contêm cobre e são, geralmente, tratadas antes da usinagem. As pressões específicas de corte são mais altas e, embora os metais sejam ainda pouco dúcteis, a usinabilidade é razoavelmente boa. As ligas 353 T e 361 T contêm pequenas quantidades de silício e são mais difíceis para usar. As pressões específicas de corte são altas, mas a usinagem conduz a superfícies mais limpas.

Considerando a liga 317 T, esta contém uma pequena quantidade de chumbo, devido à usinabilidade ser excelente.

Já as ligas de alto silício, contendo 5% ou mais de silício, são de usinagens mais difíceis. Desse modo, é praticamente impossível obter um acabamento espelhado como se obtém com outras ligas de alta resistência. As superfícies

usinadas geralmente apresentam-se com pequeno brilho e são usinadas, em geral, com ferramenta de metal duro.

Comparado com metais ferrosos o alumínio e suas ligas são de fácil usinagem, além disso, apresentam pressão específica de corte mais baixa, e mais alta velocidades de corte, avanço e grande produção de cavaco. (FERRARESI, 1970).

Também é de parecer de Ferraresi (1970), devido a seu alto coeficiente de dilatação térmica, o alumínio em usinagem deverá ser mantido sempre frio quando se pretende que suas dimensões sejam controladas corretamente.

Dependendo da severidade da separação, o alumínio e suas ligas podem ser usinados a seco, com óleos ou emulsões. Antigamente usou-se mistura de querosene e óleo de gordura (ou então óleo de gordura puro). Atualmente, são usados emulsões e óleos graxos-minerais sulfurados que dão melhores resultados em todos os empregos. (FERRARESI, 1970).

Outra abordagem sobre esta questão vem de Diniz, Marcondes e Coppini (2008), recomendam, no caso de usar óleo, que a viscosidade deste seja baixa, para maior poder refrigerante, quando o fluxo é contínuo e abundante. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Geralmente o alumínio pode ser usinado facilmente, já que a energia consumida por unidade de volume de metal retirado é muito baixa. Assim, as temperaturas de usinagem são geralmente baixas e altas velocidades de corte podem ser usadas. Os critérios de usinabilidade, baseados na rugosidade da peça e na característica do cavaco, não quer dizer que o alumínio tenha usinabilidade alta, pois em condições normais de usinagem o cavaco formado é longo e o acabamento superficial obtido não é bom. Mas, os bons acabamentos superficiais podem ser obtidos se a velocidade de corte for suficientemente alta e a geometria da ferramenta for adequada.

Entretanto, as características de usinagem do alumínio e suas ligas podem ser afetadas pela variação de alguns fatores, como elementos de liga, impurezas, processos de fundição e tratamentos aplicados ao metal. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Portanto, as propriedades mecânicas e térmicas do alumínio puro são fatores decisivos durante a usinagem de suas ligas.

### **2.2.1 Propriedades mecânicas das ligas de alumínio**

O alumínio apresenta um módulo de elasticidade de cerca de 1/3 do módulo de elasticidade do aço. Importante dizer, que sob a mesma força de corte, o alumínio se deforma três vezes mais que o aço. Mas, esse fato tem consequências negativas para obter boas superfícies usinadas, podendo com isso gerar deformações indesejadas, isto quer dizer, que não se deve usar esforços acima do limite para fixação das peças. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2005).

Em alguns casos, as ligas de alumínio apresentam um limite de resistência equivalente, em relação a alguns aços de baixo teor de carbono em temperatura ambiente e em altas temperaturas; mesmo assim, essa resistência é bastante reduzida. Fato esse, que favorece a usinagem, pois, já que a temperatura é inerente ao processo, e as ligas de alumínio possuem condutividade térmica alta, isto faz com que elas atraem boa parte do calor produzido durante a usinagem, com isso, as forças de usinagem das ligas de alumínio são bem baixas, comparadas aos aços.

Os efeitos da condutividade térmica e dureza do material são particularmente aplicáveis às ligas de alumínio. A alta condutividade térmica do alumínio favorece a usinabilidade, porém a dureza da liga de alumínio precisa ser maior que 80HB, pois, se a dureza for menor, existe a tendência muita alta de formação de aresta postiça de corte, tornando com isso a obtenção de rugosidade baixa. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2005).

O coeficiente de dilatação térmica do alumínio pode gerar tolerâncias dimensionais apertadas.

A resistência ao escoamento do material aumenta com a diminuição do tamanho de grão (PETCH, 1953), essa redução pode, também, levar a baixa temperatura e/ou de alta velocidade de deformação super plástica (KAWASAKI; LANGDON, 2007). Além disso, grãos ultrafinos têm outras características estruturais, tais como:

- a) em nano escala nano precipitados;
- b) subestrutura;
- c) luxação;

- d) segregações de átomos de soluto podem ser introduzidos durante o processamento de material termo-mecânica, e assim, aumentar ainda mais a sua resistência.

Foi demonstrado, recentemente, que tal nano estruturação das ligas Al pode melhorar fortemente não apenas a sua resistência mecânicas e propriedades físicas, tornando-os atrativos para aplicações estruturais e funcionais (VALIEV; ISLAMGALIEV; ALEXANDROV, 2000; VALIEV *et al.*, 2006; ZHILYAEV; LANGDON, 2008).

A Tabela 1 apresenta as características mecânicas e físicas da liga de alumínio SAE 323 similar a liga alumínio AL 380.

**Tabela 1 - Características Mecânicas**

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Ligas de Alumínio</b>
	<b>SAE 323 / A 380</b>
Final Resistência à Tração Ksi (MPa)	46 (317)
Rendimento Força Ksi (MPa)	23 (160)
Alongamento % Em 2in. (51mm)	3.5
Dureza BH	80
Resistência ao cisalhamento Ksi (MPa)	28 (190)
Resistência ao Impacto ft-lb	-
Fadiga Força Ksi (MPa)	20 (140)
Módulo de Young psi x 10 <sup>6</sup> GPa	10,3 (71)
<b>Propriedades Físicas</b>	
Densidade lb/pol <sup>3</sup> (g / cm <sup>3</sup> )	0.099(2.74)
Faixa de fusão ° F(° C)	1000-1100 (540-595)
Calor específico BTU / lb ° F(J / kg ° C)	0,23 (963)
Coefficiente de expansão térmica $\mu$ in / in ° F $\mu$ m / m ° K	12,2 (22,0)
Condutividade Térmica BTU / fthr ° F (W / m ° K)	55,6 (96,2)
Condutividade Elétrica% IACS	27
Razão de Poisson	0,33

**Fonte: CANADA Metal, 2013**

A Tabela 2 apresenta características adicionais da liga de alumínio AL SAE 323 similar a liga de alumínio A 380.

**Tabela 2 - Características Adicionais da Liga de Alumínio SAE 323 / A 380**

	Ligas de Alumínio
	SAE 323 / A 380
Resistência à fissuração a quente (a)	2
Resistência à pressão	2
Capacidade enchimento (b)	2
Anti-solda para o molde (c)	1
Resistência à Corrosão (d)	4
Usinagem fácil e de qualidade (e)	3
Polimento Facilidade e Qualidade (f)	3
Galvanoplastia Facilidade e Qualidade (g)	1
Anodização (Aparência) (h)	3
Óxido de proteção química de revestimento (i)	4
Força no Temp. elevadas.	3

Fonte: CANADA Metal, 2013

(a) Capacidade de liga para resistir aos esforços de contração durante o resfriamento através de faixas de temperatura de Altas, curtas ou frágeis.

(b) Capacidade de liga fundida a fluir prontamente em morrer e preencher secções finas.

(c) Capacidade de liga fundida a fluir sem furar às superfícies morrer. Classificações dadas para anti-solda são baseadas em composições nominais de ferro de cerca de 1%.

(d) Com a resistência da liga em teste de pulverização ripas tipo standard.

(e) Avaliação composta baseada na facilidade de corte, características de cavaco, qualidade de acabamento e vida útil da ferramenta.

(f) Classificação Composto com base na facilidade e velocidade de polimento e qualidade de acabamento fornecido pelo processo de polimento típicos.

(g) Capacidade da fundição para manter uma galvanização aplicado pelo atual padrão.

(h) Avaliado em leveza de cor, brilho e uniformidade do revestimento anodizado claro aplicado em eletrólito de ácido sulfúrico.

(i) Avaliado em resistência combinada de aquecimento e revestimento prolongada para testar a temperatura.

1 = mais desejável

5 = menos desejáveis

### 2.3 Materiais para ferramentas de corte

Para seleção do material, em relação às ferramentas de corte, é preciso que seja levado em consideração os seguintes itens:

- a) material a ser usinado: consideram-se as suas propriedades mecânicas.
- ✓ processo de usinagem:
    - quando usado em máquinas convencionais geralmente se utilizam ferramentas de aço rápido, pois estas máquinas trabalham com baixa velocidade de corte. Se a usinagem for em máquinas CNC, a velocidade de corte é bem mais alta, com isso, deve-se utilizar ferramentas de metal duro, aumentando com isso a produtividade;
- b) máquina:
- ✓ devem ser avaliados os itens como:
    - velocidade de corte que se pode trabalhar com a máquina;
    - folgas que podem existir na máquina devido ao tempo de uso.
- c) ferramenta:
- ✓ as ferramentas especiais geralmente são feitas de aço rápido, quando não se trabalha em processo seriado, pois, quando este processo for seriado deve-se utilizar as ferramentas de metal duro, observando para isso, a aplicação em máquinas CNC, onde as rotações são bem mais altas que as máquinas convencionais;
- d) custo do material da ferramenta:
- ✓ nem sempre o material mais caro é o indicado para determinado processo de usinagem.
- e) condições de usinagem:
- ✓ dependendo do material, se ele sofreu operações anteriores, deve-se observar:
    - o paralelismo;
    - concentricidade;
    - excentricidade;
    - dureza, pois podem exigir ferramentas mais resistentes a dureza e ao desgaste e também ter maior tenacidade.

Para operações de corte interrompido faz-se necessário ferramentas mais tenazes para resistir aos choques internos. É importante ainda, que os materiais das ferramentas resistam até a temperatura de 1000° C, pois, em muitas operações, pode ultrapassar esta temperatura, cujo processo é denominado dureza a quente. As ferramentas de corte precisam ser resistentes ao desgaste, principalmente

desgaste a abrasão (resistência ao Atrito), e ter boa estabilidade química para evitar o desgaste por difusão.

### **2.3.1 Divisão dos materiais para ferramentas de corte**

#### **2.3.1.1 Aço rápido**

O aço rápido é indicado para ferramenta de corte por ser um aço que contém outros elementos de liga como:

- a) tungstênio;
- b) molibdênio;
- c) cromo;
- d) vanádio;
- e) cobalto; e
- f) nióbio.

Dentre esses apontamentos, ressalta-se que o aço rápido constitui-se num material tenaz, pois tem boa resistência ao desgaste e alta dureza a quente, quando comparados com os aços carbono de baixa liga. Além disso, permite trabalhar até a temperatura de corte de 600°C. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2005)

#### **2.3.1.2 Metal duro**

O termo “metal duro” é sinônimo de “widia” (como diamante), ele foi introduzido em 1923, quando Schroeter e Baumhauer, descobriram o processo de sinterização que envolve o carboneto de tungstênio e cobalto. O produto é obtido em fornos com temperaturas elevadas e uma atmosfera de gás inerte que apresenta duas características:

- a) alta dureza; e
- b) boa propriedade mecânica. (SALA *et al.*, 1994).

Na abordagem de Marcondes (1990), tungstênio puro, que é misturado com o carbono, também puro, é levado a um forno para se formar o WC a temperaturas elevadas (1375°C a 1650°C), (MARCONDES, 1990).

O tamanho de grão do carboneto de tungstênio, assim obtido, é da ordem de 0,4 a 7  $\mu\text{m}$  (JACK, 1986), o controle e o refino maior dos grãos de carboneto é obtido na etapa de moagem; já os carbonetos são moídos em meio líquido e depois secados com spray. Desse modo, a moagem pode ser feita depois da mistura com o cobalto, na proporção certa de cada classe. A mistura com cobalto é realizada comprimindo a frio em matrizes, geralmente usando uma adição de cera lubrificante para facilitar esta etapa. A cera utilizada neste processo será retirada durante o tratamento de sinterização e após a prensagem, o material já ganha o formato final desejado, porém apresentando uma porosidade de 50% em seu volume, com isso podendo ser manipulado. A sinterização segue logo após esta etapa, e é realizada no vácuo, com temperaturas entre 1500°, com a porosidade sendo reduzida para um valor abaixo de 0,01%. (JACK, 1986).

### 2.3.1.3 Material cerâmico

O material cerâmico é composto de elementos metálicos e não-metálicos; geralmente na forma de óxidos, carbonetos e nitretos, e são encontrados na natureza em grande variedade de composição e forma. A maioria tem estrutura cristalina, mas, em contraste com os metais, as ligações entre os elementos são iônicas ou covalentes. A ausência de elétrons livres faz com que as cerâmicas sejam pobres condutoras de eletricidade e, quando em seções finas, sejam transparentes. Devido às fortes ligações primárias, a maioria das cerâmicas tem alto ponto de fusão. (MACHADO; SILVA, 1999).

Os materiais cerâmicos sempre tiveram grande potencial quando utilizados como ferramentas de corte. A cerâmica tem boa dissipação de calor, isso faz com que a sua dureza em altas temperaturas não se altere. Ainda, tem também baixa reatividade com o aço, por esta razão os materiais cerâmicos podem ser utilizados em velocidades de corte elevadas, sem que ocorra o processo de desgaste de deformação ou dissolução que venha a determinar a vida da ferramenta.

Uma das principais desvantagens das ferramentas de materiais cerâmicos é a não resistência ao choque térmico e a baixa tenacidade. (JACK, 1986).

As cerâmicas possuem as seguintes propriedades:

- a) Capacidade de suportar altas temperaturas;
- b) Resistência ao desgaste;
- c) Altas durezas;
- d) Frágeis;
- e) Baixa condutividade térmica;
- f) Boa estabilidade química e térmica;
- g) Boa resistência a fluência;
- h) Alta resistência à compressão e baixa resistência a tração.

#### 2.3.1.4 *Diamante*

O diamante natural foi usado como ferramenta de corte por centenas de anos, tendo em vista que é um material de maior dureza e resistência ao desgaste. Os diamantes sintéticos foram produzidos pela primeira vez nos anos 50, mas apenas na década de 70 foi que entraram no mercado como ferramentas de corte competitivas.

Portanto, o diamante constitui-se no único cristal considerado como ferramenta ideal para ultra precisão nanométrica e de corte, uma vez que possui:

- a) a mais elevada dureza;
- b) uma melhor estabilidade química;
- c) boa resistência ao desgaste e o raio de corte bem afiado, com o desenvolvimento do corte nanométrico, a sua utilização em fabricação de peças de alta precisão tem aumentado. (ZONG *et al.*, 2006).

#### **2.3.2 Revestimentos de ferramentas**

Muitas aplicações de engenharia de superfície exigem que a resistência ao desgaste seja aperfeiçoada. Em outros casos, embora o desempenho do fator tribológico não seja o principal fator do tratamento de superfície, ele ainda pode ser crítico na determinação da vida da ferramenta. A adequada compreensão e caracterização do comportamento tribológico é essencial para o sucesso futuro de

exploração da engenharia de superfície. No entanto, a maior parte do momento disponível dos métodos de ensaio, em que a superfície é modificada, pode-se estender a uma profundidade de apenas alguns microns. Os testes desenvolvidos, especificamente para a superfície dos materiais são, muitas vezes, motivados pela necessidade de simulação especial para determinadas condições de serviços, tendo como uma base, para a pré-seleção, a tendência para aplicabilidade limitada. (RUTHERFORD *et al.*, 1996).

Assim, é possível pensar que, com o desenvolvimento da indústria, novas ferramentas com revestimento e novas tecnologias de processamento também foram desenvolvidos para a melhoria da produtividade e da precisão dos produtos. (KANGA; KIMA; KIMB, 2005).

Portanto, o revestimento de ferramentas de metal duro ganhou importância elevada, pois, além de garantir uma performance bem superior, a ferramenta sem revestimento na usinagem de materiais ferrosos, aumentou consideravelmente sua vida útil, trazendo como consequência maior produtividade e menor custo.

### **2.3.3 Revestimento de TiAlN e TiN**

O revestimentos de TiAlN e TiN são produzidos por evaporação reativa e por pulverização catódica. Antes do revestimento, camadas de óxido interfacial são usadas para modificar a aderência das propriedades do revestimento. A técnica PVD combina a evaporação catódica em arco. A descarga de arco catódico é usada para gerar um plasma constituído de um metal que multiplicam os átomos ionizados, que bombardeiam a superfície do material. (RUTHERFORD *et al.*, 1996).

Assim, a finalidade do revestimento é garantir uma ferramenta com características tenazes e macias no núcleo, com resistência ao desgaste e quimicamente inertes na superfície. (RUTHERFORD *et al.*, 1996).

As demandas de baixa condutividade térmica e baixos coeficientes de atrito, na ferramenta em operações de furação a seco, levou o advento dos revestimentos de novos multi-camada.

Estes estudos têm ajudado, consideravelmente, no fornecimento de soluções viáveis para a realização de perfuração a seco. Os revestimentos de camadas de TiN e TiAlN destinados a alternância resistem a altas temperaturas de usinagem e oferecem maior vida útil da ferramenta. É projetado para aplicação universal, através

de uma ampla gama de materiais de peças. Ele combina as características dos seus componentes e proporciona uma resistência térmica mais elevada, resistência ao desgaste, resistência ao choque e dureza a quente de mono camada de TiN revestidos.

Revestimentos TiAlN são projetados para a usinagem de materiais abrasivos, tais como folha de alumínio com elevado teor de silício. É também recomendado para condições de alto estresse térmico que ocorrem em aplicações como a furação seco. O desempenho dos revestimentos de TiAlN demonstraram ser uma função do teor de alumínio nestes revestimentos, aumentando ainda mais a suas propriedades. (KALIDAS; DEVOR; KAPOOR, 2001).

A necessidade de reduzir o atrito, para facilitar a circulação do cavaco no processo de furação, levou os investigadores a conceber revestimentos que atuam como lubrificantes sólidos na broca. O revestimentos como TiAlN oferecem a dupla vantagem de alta vida da ferramenta e boas características de escoamento de cavacos. (KALIDAS; DEVOR; KAPOOR, 2001).

#### **2.3.4 Revestimento de TiAlN e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> multicamadas pelo processo de CVD e PVD**

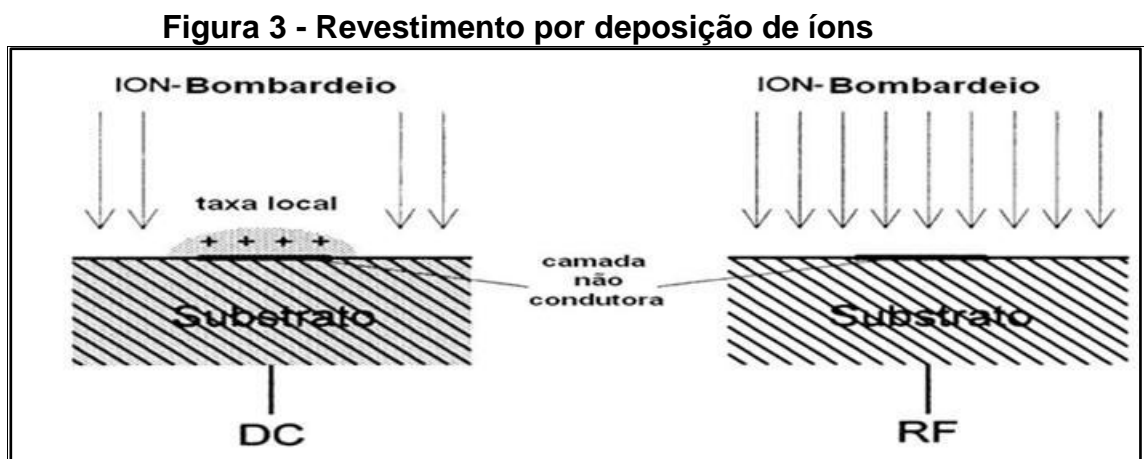
A combinação do moderno processo de revestimento PVD, são revestimentos duros de TiAlN e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, os quais constituem em um novo sistema de múltiplas camadas depositadas a temperaturas inferiores a 450 °C e é mostrado na Figura 2 a seguir. As películas são depositadas numa nova unidade CC800/RF equipada com dois DC e dois evaporadores de RF. O comportamento do extraordinário filme depositado dão mais vantagens para o revestimento de ferramentas de metal duro, mas também abre a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para o revestimento na ferramentas de HSS.

Multicamadas de TiN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> depositados pelo processo de CVD provaram ter bons desempenhos em metal; além de serem também capazes de depositar quase todo material condutor e não condutor de revestimento, por pulverização catódica de íons, em larga escala industrial para operações de corte durante um longo período de tempo. Este processo, possivelmente, se deve ao fato, de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ter excelente condução térmica e em geometrias complexas, resistência e estabilidade. O Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> depositado por PVD possuem as vantagens de baixa temperatura de deposição e

menores espessuras de revestimento. Estudos anteriores enfrentaram duas situações:

- a) em primeiro lugar, o PVD  $\text{Al}_2\text{O}_3$  não tem forma definida. A uma temperatura crítica de cerca de  $500^\circ\text{C}$ , o que provoca as alterações na densidade e na adesão de revestimento;
- b) em segundo lugar, os sistemas de PVD para a deposição de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , no revestimento sobre ferramentas em escala industrial, ainda não estão disponíveis. O primeiro problema pode ser superado por adição de azoto e/ou titânio para o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que estabiliza a modificação amorfo até temperaturas mais elevadas. A segunda é resolvida pelo novo sistema de revestimento CC800/RF totalmente automatizado, o que é capaz de depositar quase todo o material de revestimento condutor de íons por pulverização catódica, em lotes industriais de grande escala e em geometrias complexas. (LEYENDECKER *et al.*, 1997).

A Figura 3 apresenta o revestimento por deposição de íons



Fonte: LEYENDECKER, *et al.*, 1997.

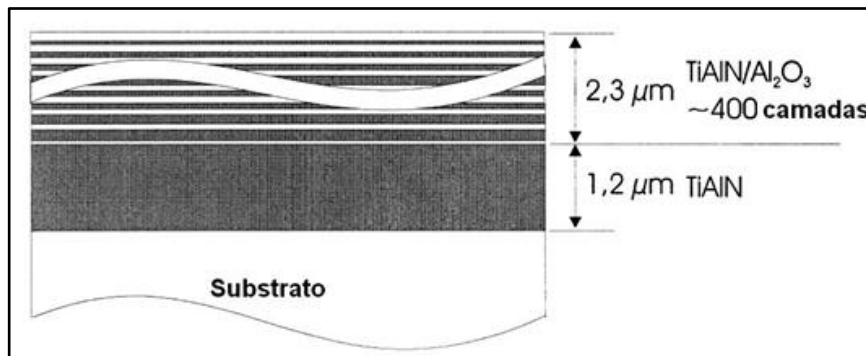
Para a deposição do  $\text{TiAlN-Al}_2\text{O}_3$  multicamadas (ALOX) dois  $\text{TiAl}$  (Ti: Al=50:50at%) e dois  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , o processo de revestimento sempre começa com uma camada  $\text{TiAlN}$  com uma potência máxima de densidade  $40\text{ Wcm}^{-2}$  de cada  $\text{TiAl}$ .

Este disco de camada de revestimento assegura uma boa aderência ao substrato. Logo, os  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são ligados e a potência da evaporação que é aumentada constantemente até uma densidade de potência máxima de  $20\text{ Wcm}^{-2}$  de cada  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Ao mesmo tempo, a energia para as fontes de TiAlN e a pressão parcial de azoto são diminuídos para obter uma zona de transição gradual. Esta sequência pode ser repetida facilmente pela linguagem de programação (LEYENDECKER *et al.*, 1997).

A Figura 4 apresenta desenho esquemático representando a espessura e a quantidade de camadas de um revestimento de ALOX 400.

**Figura 4 - Desenho esquemático que representa a espessura e a quantidade de camadas de um revestimento de ALOX 400**

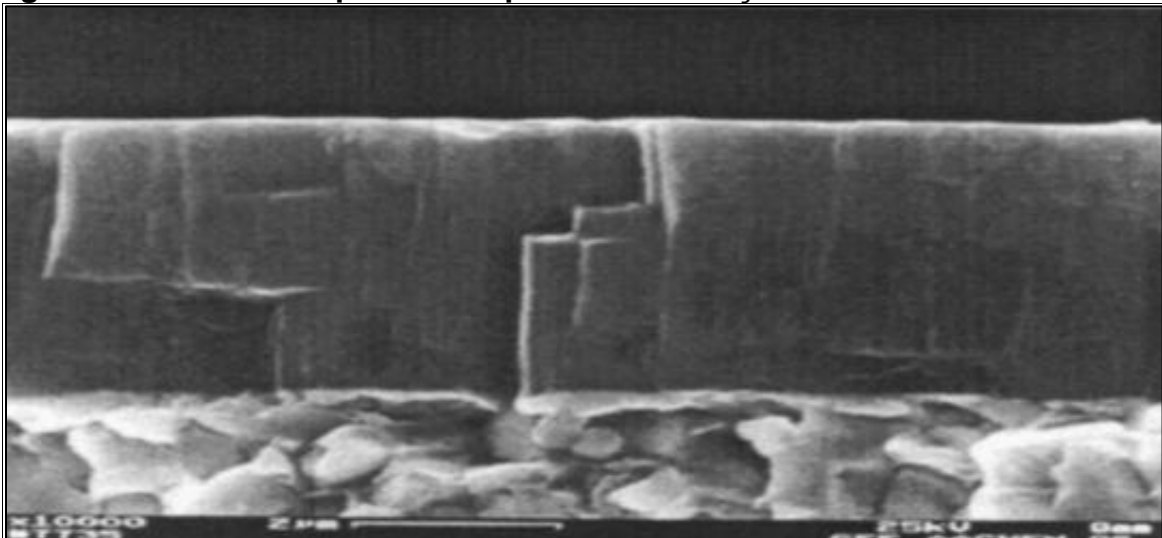


Fonte: LEYENDECKER, *et al.*, 1997.

### 2.3.5 Revestimento de TiN, TiAlN e ALOX pelo processo de PVD

Películas constituídas por finas camadas individuais mostram a estrutura de camadas múltiplas na secção transversal, mas uma estrutura muito fina e não colunar (Figura 5).

**Figura 5 - Desenho esquemático que mostra a seção transversal de ALOX 400**



Fonte: LEYENDECKER, *et al.*, 1997.

A dureza de todo o revestimento pode ser aumentada em comparação com TiAlN PVD, podendo ser conduzida de volta para uma função de apoio das camadas de material duro covalentes (LEYENDECKER *et al.*, 1997).

O revestimento das ferramentas feito por TiAlN pelo processo de PVD tem apresentado melhora na produtividade de corte, permitindo que a velocidade possa ser aumentada. Assim, o TiAlN desempenha um papel cada vez mais importante no projeto de revestimentos pelo processo de PVD.

O TiAlN só pode ser produzido utilizando processo de plasma. Em processo de deposição de plasma, ele é depositado como uma fase meta estável. Dependendo da aplicação, pode ser substituído pelo alumínio. (PRENGEL, *et al.* 1997).

As vantagens na utilização de um revestimento feito pelo processo de PVD, são:

- a) boa estabilidade química que proporciona melhor resistência ao desgaste de cratera, alta dureza a quente que aumenta a resistência ao desgaste e aumenta à resistência a oxidação que suporta temperaturas mais elevadas.

Na Tabela 3, são apresentados os dados das deposições metalográficas de multicamadas de ALOX, em comparação com o processo de revestimento de CVD de TiN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PVD TiAlN e revestimentos TiN PVD.

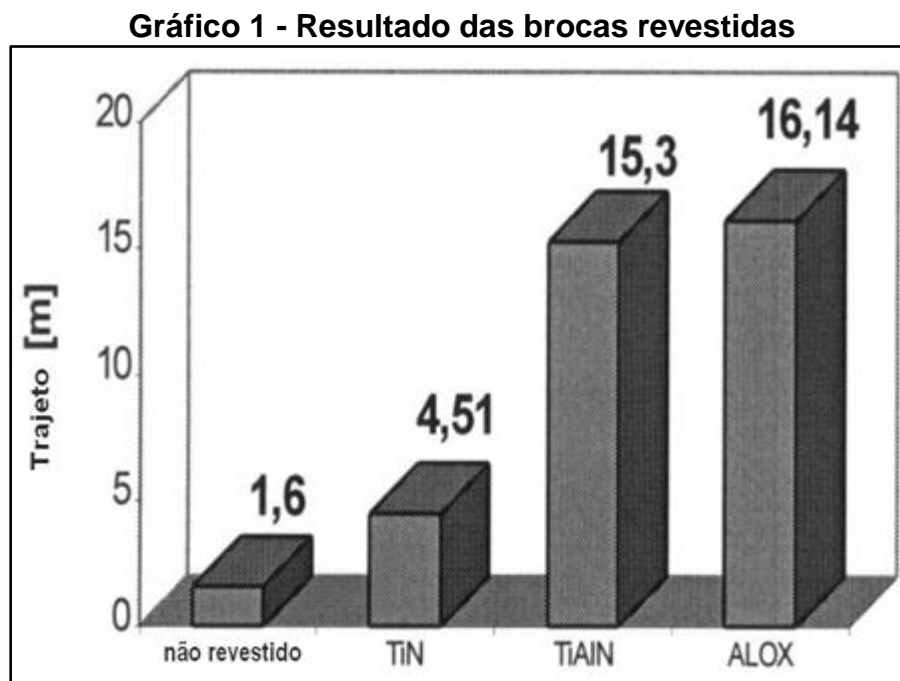
**Tabela 3 - Tipo de camada de revestimento**

Tipo de Camada	Espessura	Dureza (HV <sub>0,05</sub> )	Carga Crítica (N)	Número de Camadas	Cor
TiN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CVD	8 – 10	2700	50		Dourado
TiAlN PVD	3 – 4	3300	90	1	Preto
TiN PVD	3 – 4	2300	80	1	Dourado
ALOX 400 PVD	3 – 4	3500	80	≈ 400	Cinzento

Fonte: Elaborado pelo autor

A dureza de todo o revestimento pode ser aumentada em comparação com TiAlN PVD, que pode ser conduzida de volta para uma função de apoio das camadas de material duro covalente (LEYENDECKER *et al.*, 1997).

O Gráfico 1 representa o desempenho no processo de furação para as brocas de diâmetro de 8,00 mm DIN 338, HSS sem revestimento e com revestimentos de TiN, TiAlN e ALOX. Há resultados promissores com ALOX 400 (400 camadas) revestido HSS brocas para a primeira vez. O revestimento ALOX é comparado com não revestidos e o padrão de TiN e TiAlN revestidos como referência para um revestimento típico em ferramentas de HSS no processo de fresamento. (LEYENDECKER *et al.*, 1997).



Fonte: LEYENDECKER, *et al.*, 1997.

### 2.3.6 Fluidos de corte

Os fluidos de corte surgiram em 1890, quando Frederick Winslow Taylor aplicou água nas operações de usinagem, para reduzir as temperaturas de trabalho (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2005).

Visando aprimorar o desempenho dos fluidos de corte, foram adicionados aditivos químicos, dando origem aos fluidos de corte emulsionáveis (HASIB; AL-FARUK; AHMED, 2010).

Dentro dessas concepções, os fluídos de corte são os materiais capazes de:

- a) lubrificar;
- b) refrigerar;
- c) controlar a rugosidade da superfície;
- d) reduzir esforços de usinagem;
- e) proteger contra a corrosão;
- f) remover cavacos do local de corte; e
- g) ampliar a vida útil das ferramentas cortantes. (MCCOSH; SWACO, 2007; BRINKSMEIER *et al.*, 1999; ADLER *et al.*, 2006; KOPAC; SALI, 2006)

Por conseguinte, quando o fluído de corte é aplicado na furação, por meio de sistemas hidráulicos, ocorre um ciclo contínuo, onde:

- a) o fluído de corte que se encontra em repouso no reservatório;
- b) é succionado por uma bomba hidráulica;
- c) o fluído é conduzido por tubulações e mangueiras;
- d) a vazão de fluído de corte atinge o local de furação;
- e) em seguida, o fluído de corte escoar por canais e orifícios, e retorna ao reservatório (KOLE *et al.*, 1997).

Dentre as funções do fluido de corte têm-se a redução do desgaste da ferramenta, melhoria do acabamento superficial do componente, refrigeração e lubrificação da interface peça/ferramenta de corte/cavaco, minimização dos efeitos da formação da aresta postiça de corte, proteção da peça usinada, ferramenta de corte e máquina-ferramenta contra corrosão e transporte do cavaco para fora da região de corte (FERRARESI, 1977; ARMAREGO; BROWN, 1967; KLOCKE; EISENBLÁTER, 1997; SILLIMAN, 1992; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Estudos feitos em 2002 concluíram que os furos obtidos com o sistema MQL apresentaram qualidade similar ou melhor que os obtidos com óleo solúvel abundante, e, também, a broca de carbeto revestida com diamante com a condição MQL não apresentou qualquer vantagem, quando comparada à broca não revestida K10 na furação de liga Al-Si. (BRAGA *et al.*, 2002).

### 2.3.6.1 Processo de furação a seco

Na furação a seco a ferramenta precisa resistir temperaturas elevadas, altas forças de atrito e grandes cargas mecânicas. Para tanto, a ferramenta precisa possuir alta dureza a quente, alta refratariedade e baixos coeficientes de atrito. Em grande parte, esses avanços podem ser atribuídos aos progressos em tecnologias de revestimento, em particular o eficiente processo de deposição física de vapor (PVD), como pulverização catódica que levou a numerosas possibilidades em termos de revestimentos. (KALIDAS; DEVOR; KAPOOR, 2001).

As demandas, de baixas condutividades térmicas e baixo coeficiente de atrito, nas ferramentas em operações de furação a seco levou o advento dos revestimentos. Uma boa classificação dos vários tipos de revestimentos de múltiplas camadas e as suas capacidades são apresentadas por Kustas *et al.* Estes estudos têm contribuído, consideravelmente, no fornecimento soluções viáveis para a realização de furação a seco. (KALIDAS; DEVOR; KAPOOR, 2001).

### 2.3.7 Desgaste de ferramentas

Para realizar a furação é importante definir os parâmetros de usinagem de forma adequada, de modo a assegurar a produtividade sem diminuir a qualidade dos furos, além de proteger a broca de desgastes prematuros (HUANG, 2008).

Têm sido realizados estudos na tentativa de furar alumínio a seco, em particular, furação a seco de uma liga de Al 319, mas foi considerada impraticável devido à vida útil da broca ser muito curta, uma vez que os cavacos aderiram no canal da broca, formando um acúmulo nas brocas, o que impediu o escoamento do cavaco. (XIAO; LEV; LUKITSCH, 2009).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), a vida da ferramenta é o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingido este tempo a ferramenta deve ser substituída ou reafiada.

O desenvolvimento nas indústrias tem aumentado o grande volume de resíduos gerados durante o processo de usinagem. Um dos fatores que contribui para o desgaste das ferramentas é o corte a seco, pois a geração de calor e consequentemente o aumento de temperatura na zona de corte é muito elevada.

Kanga, Kima e Kimb (2005), relatam que a teoria da fratura da ferramenta se dá através da caracterização da textura da superfície e a compreensão dos fenômenos tribológicos, tais como o atrito e a lubrificação. O grau de complexidade da forma da superfície pode ser representado por um valor de dimensão da fratura. Isto significa que um maior grau de complexidade apresentará um valor maior. O desgaste da ferramenta é um fator que tem influências dominantes na usinagem de precisão, como a rugosidade da superfície, características da rugosidade, devido ao desgaste da ferramenta.

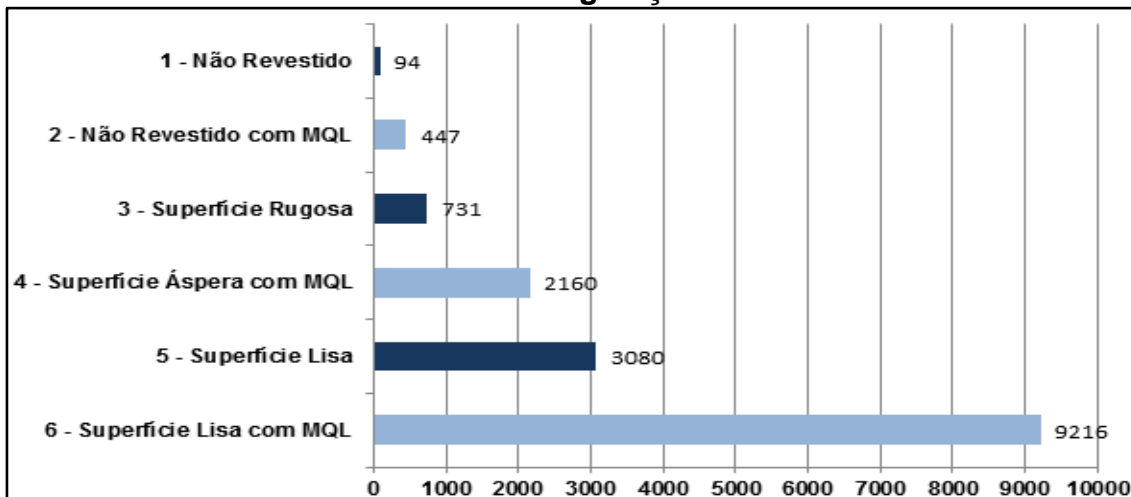
Hoje em dia, a partir de um ponto de vista prático, Deformação Plástica Severa de tarugos em massa, segundo a literatura específica, é o caminho de processamento mais promissor para a produção de ligas de Al nano estruturados para diversas aplicações industriais.

Uma vantagem significativa da técnica Deformação Plástica Severa é a questão de sua aplicabilidade que pode ocorrer, praticamente, em todas as ligas de Al comerciais.

Um corpo significativo de investigação experimental e teórica sobre as propriedades mecânicas das ligas de Al nano estruturados foi realizado nas últimas décadas. Sabirov *et al.*, (2013) demonstraram que a força e ductilidade destes materiais são controladas principalmente pela sua microestrutura. Para a caracterização micro estrutural em escala atômica (como o átomo, a técnica de tomografia sonda, átomo microscopia de força, etc.) permitiu obter um conhecimento mais profundo com relação à microestrutura, propriedades em nano escala, em particular, para resolver o problema da alta resistência e ductilidade da liga de alumínio nano estruturado. (SABIROV *et al.*, 2013)

O Gráfico 2 reapresenta o desempenho das brocas com revestimento e sem revestimento, no processo de furação com refrigeração.

Gráfico 2 - Desempenho das brocas revestidas e não revestidas na **furação com refrigeração**



Fonte: HANYU *et al.*, 2003.

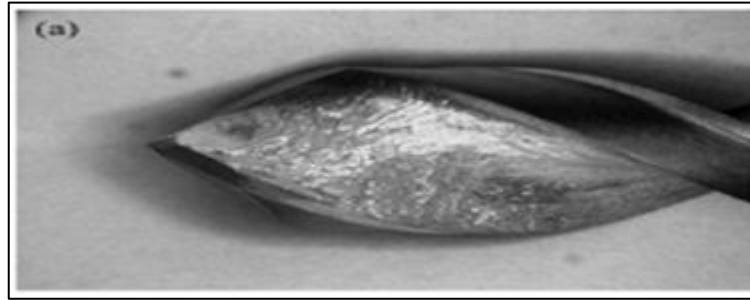
As Figuras 6a, 6b e 6c apresentam a aparência das brocas observadas pela interrupção dos testes. A Figura 6a mostra a rugosidade da superfície do revestimento de diamante nas brocas após 2000 furos feitos. Uma quantidade expressiva, de alumínio, pode ser observada, ou seja, presa na superfície da broca. A Figura 6b mostra o revestimento de diamante com superfície lisa após 3080 furos para usinagem a seco. Pouco alumínio está aderido na superfície da ferramenta.

Os desgastes observados na superfície das ferramentas se devem as forças de corte e o calor gerado durante o processo. Como no revestimento com superfície lisa as forças de atrito são menores, devido a isso ocorre melhora na durabilidade das ferramentas.

Na Figura 6c, são mostrados brocas com revestimentos de diamante com superfície lisa após 9216 furos na condição de MQL. É observado menos aderência de alumínio na ferramenta.

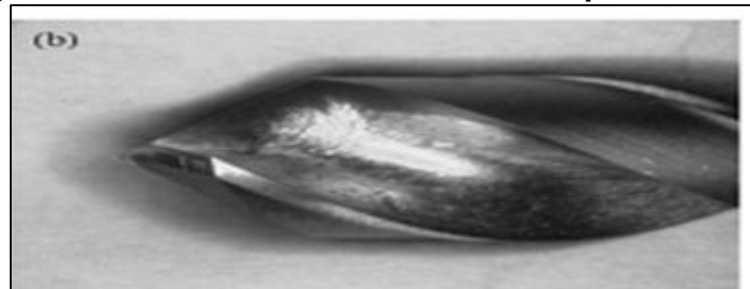
A utilização da broca está relacionada principalmente com a abrasão, devido à baixa velocidade de corte.

**Figura 6a - Broca revestida de diamante após 2000 furos**



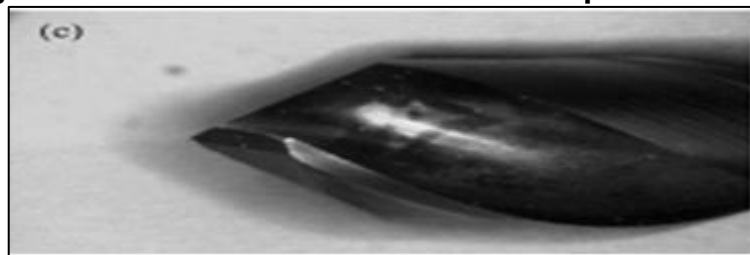
Fonte: HANYU *et al.*, 2003.

**Figura 6b- Broca revestida de diamante após 3080 furos**



Fonte: HANYU *et al.*, 2003.

**Figura 6c- Broca revestida de diamante após 9216 furos**



Fonte: HANYU *et al.*, 2003.

## **2.4 Influência dos parâmetros de corte no consumo de energia elétrica**

Reduzir o consumo de energia é uma consideração essencial na fabricação sustentável. No passado, operações de corte de metal foram otimizadas, principalmente com base em considerações econômicas e tecnológicas sem a dimensão ambiental. Na verdade, a melhoria de um fator no processo de usinagem nem sempre é possível sem o agravamento de uma outra. A utilização de uma técnica de otimização multi-objetivo seria muito útil para tomar essa decisão difícil. A fim de reduzir o consumo de energia do processo de corte, tanto a rugosidade da superfície do material e a taxa de remoção devem ser consideradas em conjunto.

A redução da energia de usinagem de máquinas-ferramentas podem significativamente melhorar o desempenho ambiental da produção nos processos (VIJAYARAGHAVAN; DORNFELD, 2010).

Nesse contexto, vários autores vêm destacando a importância da eficiência energética sobre o impacto ambiental dos processos de fabricação. A maioria destes estudos foca a avaliação dos processos de fabricação com base no estado de funcionamento e componentes de máquinas-ferramentas, equilíbrio térmico, abordagens teóricas e modelagem empírica, em paralelo ao monitoramento de energia de máquinas-ferramentas. Avram e Xirouchakis (2011) apresentaram um método estimativo dos requisitos de energia de um sistema de máquinas-ferramenta para processos de usinagem. (AVRAM; XIROUCHAKIS, 2011). Draganescu, Gheorghe e Doicin (2003) estabeleceram a relação entre a energia de uma fresadora e os principais parâmetros de corte de uma ferramenta. (DRAGANESCU; GHEORGHE; DOICIN, 2003). Já He *et al.*, (2012) apresentaram um método para avaliar o consumo de energia detalhada de centro numérico (NC) de usinagem, considerando a correlação entre os códigos NC e os componentes de consumo de energia de máquinas-ferramentas. (HE *et al.*, 2012).

É importante ressaltar, o consumo de energia pode ser adicionado ao multi-critérios de planejamento do processo, sistemas como um objetivo válido. No entanto, trabalhos recentes tratam da demanda de energia como meta de sustentabilidade que não reflete o consumo de energia real do processo de usinagem. (NEWMAN *et al.*, 2012).

### **2.4.1 Brocas**

O desempenho dos diferentes revestimentos, em condições de furação a seco e molhado, foram investigados para identificar e compreender:

- a) o seu efeito sobre o acabamento da superfície do furo produzido;
- b) a elevação da temperatura máxima de trabalho;
- c) o canal de entupimento da broca e o tamanho de perfil do furo produzido.

Uma análise estatística demonstrou que estas respostas podem estar relacionadas com o tipo de revestimento das ferramentas TiN e TiAlN. (KALIDAS; DEVOR; KAPOOR, 2001).

#### **2.4.2 Geometria das brocas**

A geometria da ponta da broca é o elemento-chave na determinação de duas características importantes de desempenho de furação, ou seja, o impulso para cima ao longo do eixo da broca e o torque para a furação. A minimização de ambas as quantidades conduz a uma melhoria no desempenho através da redução de deflexão da broca para empurrar carga, diminuindo a potência necessária para a operação de furação e melhorando a vida da broca.

Apesar de a configuração do perfil de flanco cônico ser o mais usado na geometria da ponta da broca, e ser mais fácil para usinagem, ele não irá proporcionar a ação de corte mais eficiente. Para superar este problema, um número de diferentes formas de ponta foram desenvolvidos para fornecer tais características favoráveis inerentes a broca helicoidal, com uma aresta de corte em forma de S que fornecem uma ação de auto-centragem e a broca Raconw que fornece uma redução na saída formação de rebarbas.

No entanto, essas geometrias tendem a evoluir a partir da experiência, empregando extensos experimentos para avaliar e modificar o desenho que não é bom em relação ao impulso e redução de torque. A metodologia, enraizada na fabricação da broca através da furação e os parâmetros de furação, são, portanto, necessários para chegar a uma broca com a geometria da ponta, que mantém as características favoráveis para uma broca cônica, Raconw e brocas helicoidais, otimizando sua forma, e com isso, minimizando o empuxo e o torque.

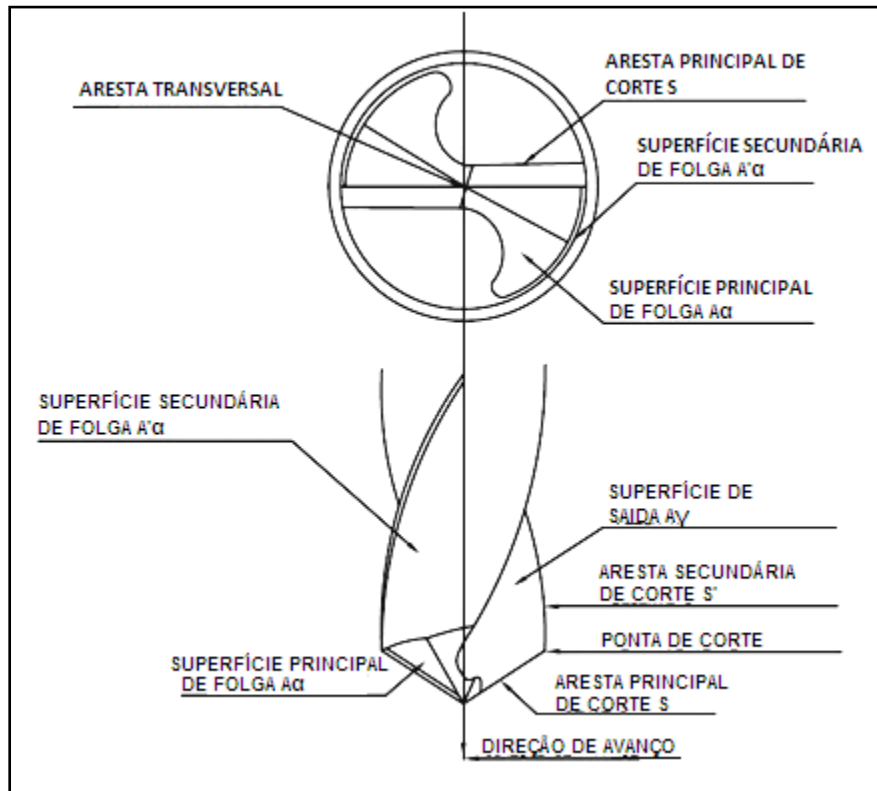
Assim, tem havido considerável trabalho na área de furação para melhoria de desempenho, modificando a geometria da ponta de broca usando superfícies de flanco composta de múltiplas faces. (PAUL; KAPOOR; DEVOR, 2005).

Uma grande variedade de pontos de furação está disponível comercialmente, cujos pontos diferem apenas no número, arranjo, orientação, e as dimensões dos segmentos sobre os seus pontos de corte. Os modelos gerais, para o cálculo das forças e momentos de força para uma ampla gama de tipos de furação, podem, portanto, ser desenvolvido por um método paramétrico para descrever a geometria

de um ponto arbitrário, como um conjunto de segmentos distintos. (STEPHENSON; AGAPIOU, 1992).

A Figura 7 apresenta o desenho técnico que representa as arestas e as superfícies de uma broca helicoidal.

**Figura 7 - Desenho técnico que representa as arestas e as superfícies de uma broca helicoidal**



Fonte: DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000.

## 2.5 Parâmetros dimensionais

A medição é empregada para monitorar, controlar ou investigar um processo ou fenômeno físico. A qualidade, a segurança e o controle de um processo são assegurados através da medição. O resultado de uma medição é uma faixa de valores associados a uma unidade de medida, onde o valor verdadeiro está compreendido nesta faixa. (GONÇALVES JÚNIOR, 2001)

### 2.5.1 Rugosidade

Segundo Oliveira (2004), quando as superfícies são observadas com recursos apropriados, elas apresentam irregularidades. As orientações (sentido) das

irregularidades dependem do tipo de processo que deu origem à superfície. Deve-se salientar que as superfícies reais de engenharia são compostas do perfil sem filtragem, ou seja, compostas de forma, ondulação e rugosidade.

A rugosidade das paredes do furo é influenciada por três fatores:

- a) a velocidade de rotação da broca;
- b) a velocidade de avanço da ferramenta; e
- c) a geometria da ferramenta cortante (RAHMAN; MAMAT; WAGIMAN, 2009). A rugosidade dos furos pode ser medida utilizando um equipamento chamado rugosímetro (ZEILMANN *et al.*; VACARO, 2010).

O rugosímetro é um equipamento eletrônico, que mede os picos e vales de uma superfície. A medição ocorre por meio do deslocamento de uma agulha fabricada em diamante, sobre a superfície do material (COSTA; SILVA; MACHADO, 2007).

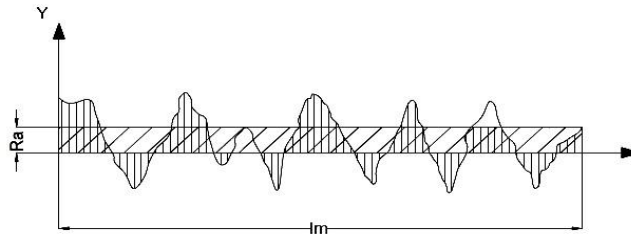
As informações medidas pelo rugosímetro são convertidas para parâmetros de rugosidade (TEDESCO *et al.*, 2006). Os parâmetros de rugosidade para este trabalho compreendem:

- a) rugosidade média ( $R_a$ );
- b) rugosidade máxima ( $R_y$ );
- c) rugosidade total ( $R_t$ ); rugosidade de profundidade média ( $R_z$ ); e
- d) rugosidade média do terceiro pico e vale ( $R_{3z}$ ) (REBRAC, 2009).

O valor de rugosidade exigido pela operação deve ser observado no desenho da peça antes da operação, deste modo, será possível definir as condições de usinagem que, possibilitem conceder a rugosidade especificada para a peça (WALKER, 2004).

A rugosidade média ( $R_a$ ) expressa o desvio médio de um perfil de sua linha ou a distância média de um perfil desde sua linha média, sobre um comprimento médio é mostrada na Figura 8.

**Figura 8 - Conceitos básicos na avaliação de superfícies**



**Fonte: KÖNIG; KLOCKE, 1997**

A expressão para calcular  $R_a$  é apresentada na equação 1:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_{x=0}^{x=l} |h_1| \cdot dx \quad (1)$$

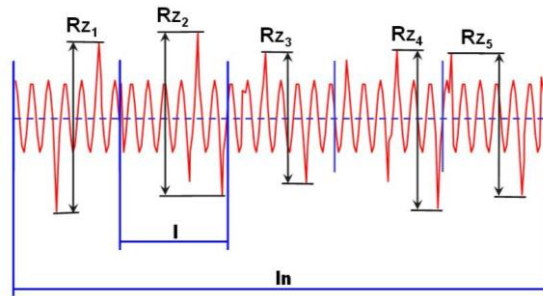
Com ou sem erros, após executar uma determinada quantidade de furos, a broca inevitavelmente acaba se desgastando (PATIL, 2008). Para saber o momento adequado de trocar esta ferramenta, é importante saber identificar os tipos de desgaste das brocas helicoidais.

O parâmetro de rugosidade  $R_z$  mede a variação do acabamento superficial no processo de fabricação.

Comparando-se o parâmetro  $R_z$  com  $R_a$ , pode-se dizer que o parâmetro  $R_z$  é mais sensível às mudanças no acabamento superficial.

$R_z$  (DIN) também conhecido como parâmetro  $R_z$  é a média de todos os valores de  $Z$  no comprimento de avaliação, onde  $Z$  é a altura máxima das rugosidades medidas no comprimento de amostragem (Figura 9).

**Figura 9 - Parâmetro Rz**

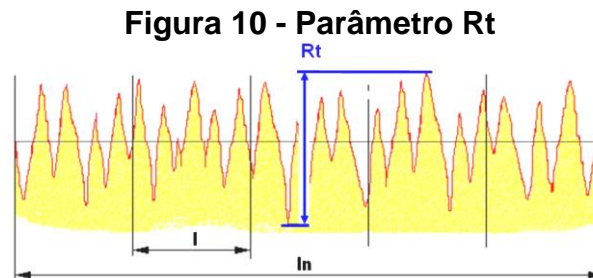


Fonte: TAYLOR HOBSON PRECISION apud OLIVEIRA; PALMA; SALES, 2013.

A equação matemática que define a rugosidade média é mostrada abaixo:

$$(R_z(DIN) = R_{tm}) = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 \dots + Z_n}{n} \quad (2)$$

A rugosidade  $R_t$  mede a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ( $l_n$ ). (Figura 10).



Fonte: TAYLOR HOBSON PRECISION apud OLIVEIRA; PALMA; SALES, 2013.

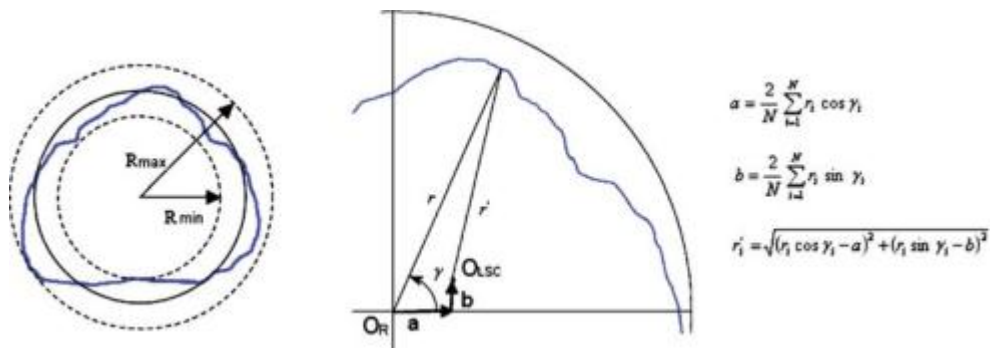
O emprego do parâmetro  $R_t$  depende do tipo da superfície. A presença de maiores amplitudes, entre picos e vales, não é recomendado em alojamentos de retentores o que faz com que o  $R_t$  seja parâmetro mais conveniente para análise desta superfície.

### **2.5.2 Circularidade**

A circularidade é uma tolerância de forma macrogeométrica, que tem relação com os diâmetros encontrados na peça quando medida. As diferenças do círculo real para o círculo teórico são genericamente denominadas ovalizações. Tolerância

de circularidade é a variação entre duas circunferências do ponto mais afastado do centro, ao ponto mais próximo. O campo de tolerância no plano considerado é limitado por dois círculos concêntricos e é apresentado na Figura 11.

**Figura 11 - Representação da circularidade**



Fonte: KURT; KAYNAK; BAGCI, 2008.

### 2.5.3 Análise de forma

A precisão de qualquer furo produzido por furação depende de muitos fatores, Incluindo:

- o processo utilizado;
- a peça e a máquina;
- parâmetros de usinagem e a rigidez do conjunto.

A precisão é também dependente da geometria da ferramenta utilizada (STEMMER, 2001; WICK, 1988). Existem erros ou imperfeições que podem ocorrer na furação dependendo das condições do processo.

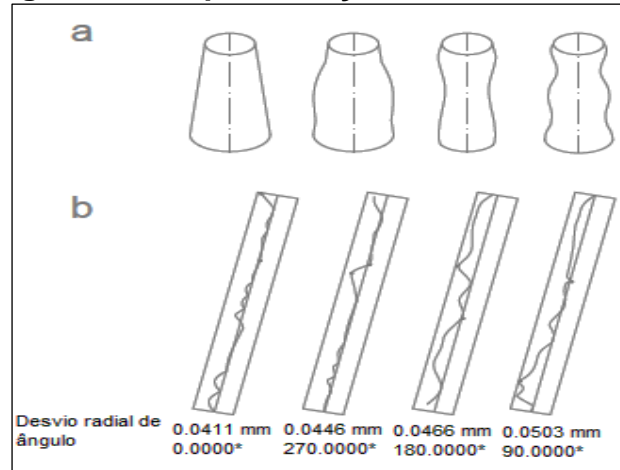
### 2.5.4 Cilindricidade

Tolerância de cilindridade constitui-se na condição pela qual a zona de tolerância especificada é a distância radial entre dois cilindros coaxiais.

Kress (1974) encontrou resultados insatisfatórios no desvio de cilindridade em furos desalinhados, e recomenda um erro de alinhamento entre o pré-furo e o alargador menor que 0,020 mm.

A cilindridade também é uma tolerância de forma macrogeométrica, que tem relação com os cilindros coaxiais. A diferença entre estes cilindros coaxiais é a cilindridade; em que o campo da tolerância é limitado por dois cilindros coaxiais, distantes em “t” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1976) apresentado na Figura 12.

**Figura 12 - Representação de cilindridade**



Fonte: KURT; KAYNAK; BAGCI, 2008.

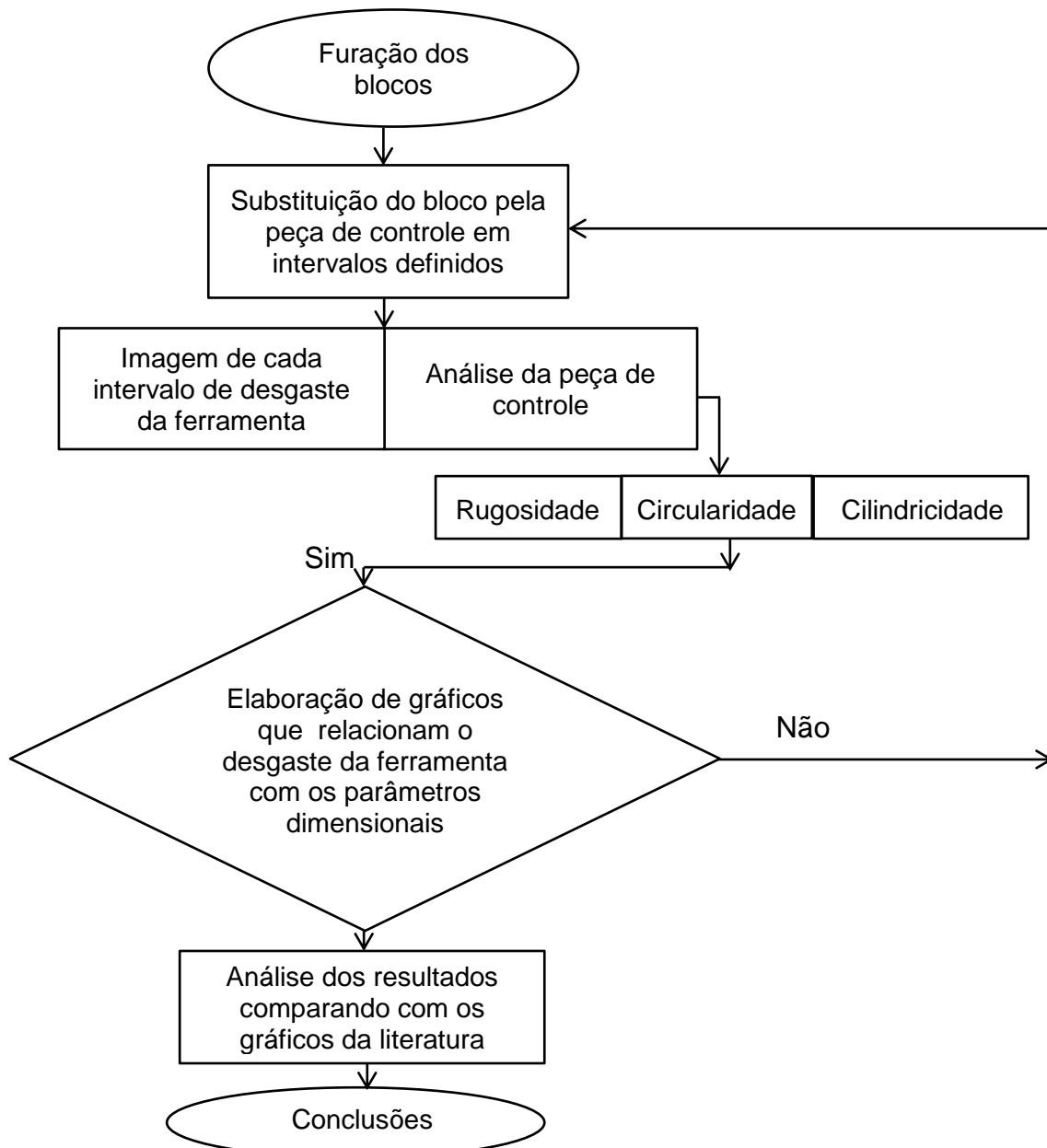
### 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

As placas de alumínio em alumínio SAE 323 similar a liga de alumínio A 380, que foram utilizadas neste estudo, têm as seguintes medidas: Comprimento: 495mm x Largura: 243 mm x Espessura: 47 mm.

Foram confeccionadas 60 amostras com as seguintes dimensões: Comprimento: 25 mm x Largura: 18mm x Espessura: 18mm.

O fluxograma a seguir demonstra a sequência que foi seguida.

#### 3.1 Fluxograma do processo



Fonte: Elaborado pelo autor

O experimento consistiu na realização de 448 furos, com brocas de 8 mm, sendo a distância entre furos de 10mm.

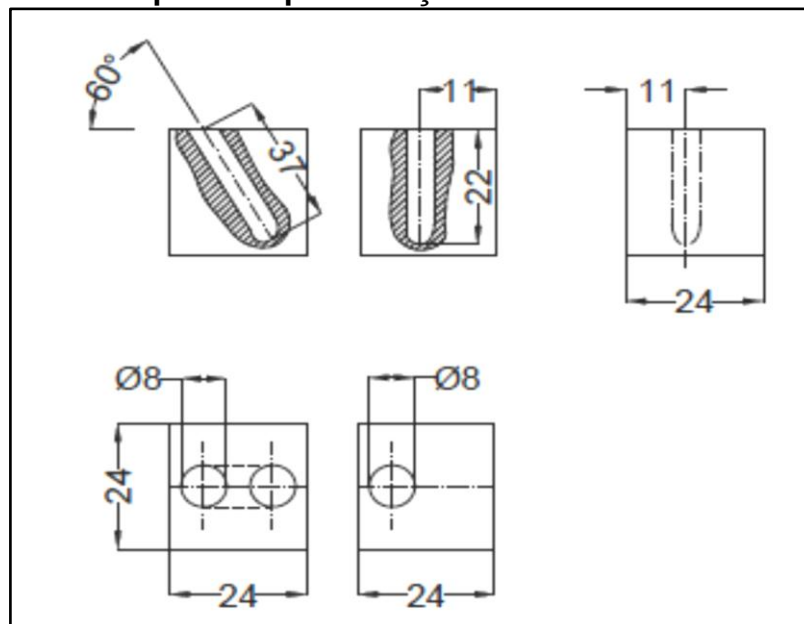
Antes do início e, após a furação de 112 furos foi retirado uma amostra, para medições da dimensão do furo, rugosidade Ra, Rz, Rt, cilíndricidade e circularidade.

### 3.2 Método utilizado na obtenção de imagens das brocas

As brocas utilizadas nos ensaios foram fotografadas com o auxílio de um microscópio óptico da marca Mitutoyo, Toolmaker Microscope, com uma lente de aumento de 30 vezes que está no laboratório da PUC Minas, onde foram medidas as dimensões da aresta postiça de corte e observados a adesão do material de alumínio na broca.

Para permitir que as brocas fossem fotografadas, sempre na mesma posição, foi desenvolvido e confeccionado um dispositivo de fixação. A Figura 13 ilustra o desenho simplificado do dispositivo empregado na fixação das brocas helicoidais, mostrando também a posição em que foram retiradas as fotos laterais e frontais da aresta de corte das brocas.

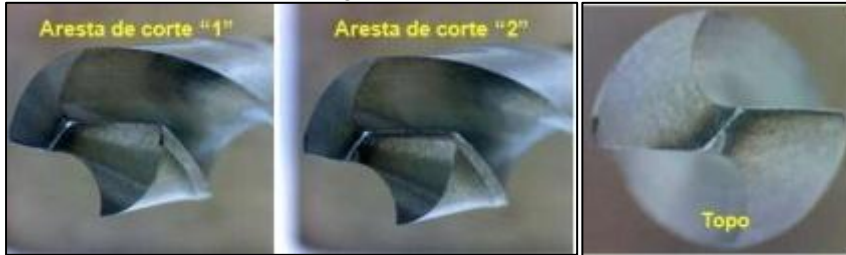
**Figura 13 - Dispositivo para fixação das brocas no microscópio**



Fonte: Elaborado pelo autor

A Foto 1 apresenta as posições laterais e de topo da aresta de corte da broca

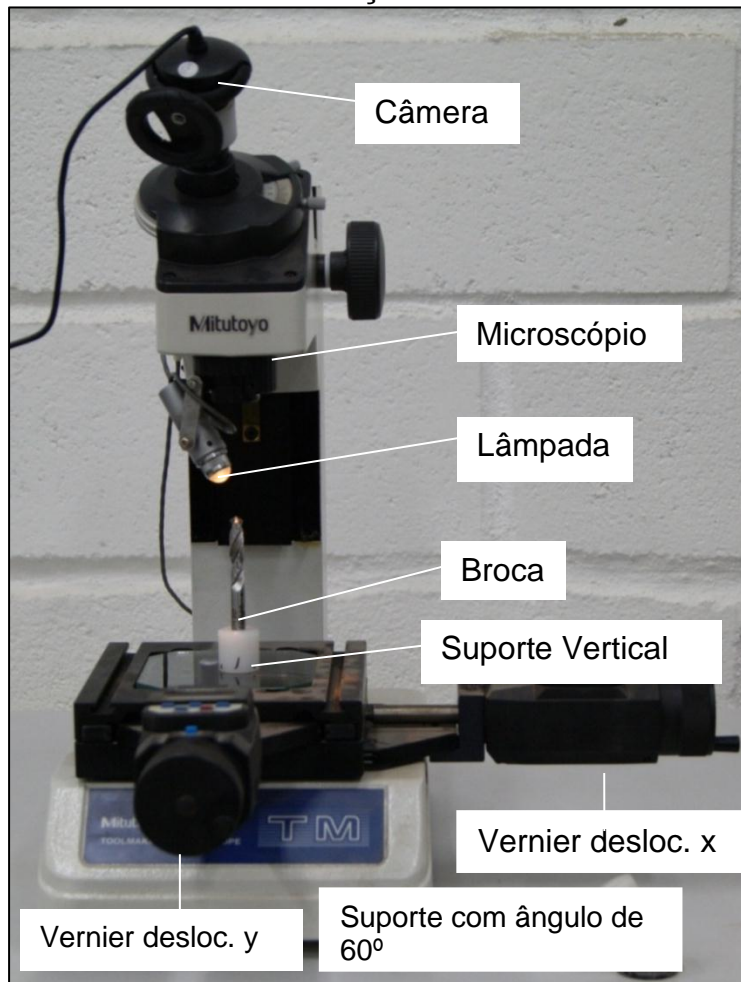
**Foto 1 - Cada uma das posições que foram fotografadas as brocas**



Fonte: Fotografia do autor

A Foto 2 mostra o Microscópio Mitutoyo que pertence ao laboratório da PUC Minas com lente de aumento de 30 vezes com resolução milesimal, dotado com dispositivo para analisar e fotografar a aresta posita de corte.

**Foto 2 - Microscópio de medição Mitutoyo com lente de aumento de 30 vezes com resolução milesimal**



Fonte: Fotografia do autor

Para cada bloco, que foi retirado como amostra, foram analisados os Parâmetros de Rugosidade Ra, Rz e Rt através de um Rugosímetro Portátil da marca INSTRUTEMP que se encontra no laboratório da PUC Minas. Além disso, foram analisados os Parâmetros de Rugosidade Ra, Rz e Rt através do Equipamento de medição da Taylor Hobson. A Foto 3 mostra o Taylor Hobson pertencente a FIAT Automóveis

**Foto 3 - Rugosímetro Taylor Hobson**

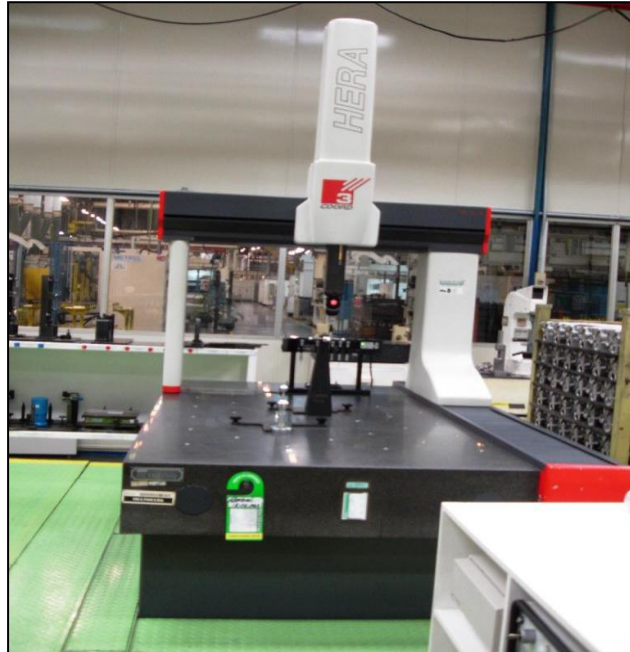


**Fonte: Fotografia do autor**

Logo após, foram feitas as medidas de furos relativos ao dimensional, circularidade e a cilindricidade, através de uma Máquina Tridimensional pertencente ao laboratório da FIAT Automóveis.

A Foto 4 mostra a Máquina Tridimensional Mitutoyo pertencente a laboratório da FIAT Automóveis.

**Foto 4 - Máquina Tridimensional Mitutoyo**



**Fonte: Fotografia do autor**

Foram compradas para este experimento quatro tipos de brocas, a saber:

- a) 8 brocas de aço rápido;
- b) 8 brocas de metal duro;
- c) 8 brocas de metal duro revestida de TiN; e
- d) 8 Brocas de metal duro revestida de TiNAl. Cada broca fez 448 furos.

A Tabela 4 mostra as características das brocas que serão usadas no experimento.

**Tabela 4 - Brocas HSS, Metal Duro sem revestimento e com revestimento de TiN e TiAlN**

	Ferramenta A	Ferramenta B	Ferramenta C	Ferramenta D
Material	HSS	MD	MD	MD
Referência	Broca	Broca	Broca	Broca
Cobertura	Nenhuma	Nenhuma	TiN	TiAlN
Ângulo de Hélice	15	15	15	15
Ângulo de ponta	120	140	140	140

Fonte: Elaborado pelo autor

A parte experimental consistiu em uma ordem de experimentos e análise dada por:

- a) Realização de furos em uma máquina CNC ROMI BRIDGEPORT - DISCOVERY 560, 3 eixos, comando numérico Siemens, data de fabricação: 28/05/1999, Tensão de alimentação: 24 V, corrente máxima: 1 A, Pressão de alimentação: 0,8 MPa, Pressão de trabalho: 0,6 MPa, conforme Foto 5 abaixo, com taxa de avanço 0,20 mm e velocidade de corte de 45 m/min.

Esta máquina é utilizada para processos de fresamento e furação.

A Foto 5 abaixo mostra a máquina CNC, com suas principais partes.

**Foto 5 - Máquina CNC**

**Fonte: Laboratório PUC Minas, 2013.**

Na realização dos ensaios, foi utilizada velocidade de corte ( $v_c$ ) de 45m/min, avanços de corte/dente ( $f_z$ ) de 0,04 mm/rev.

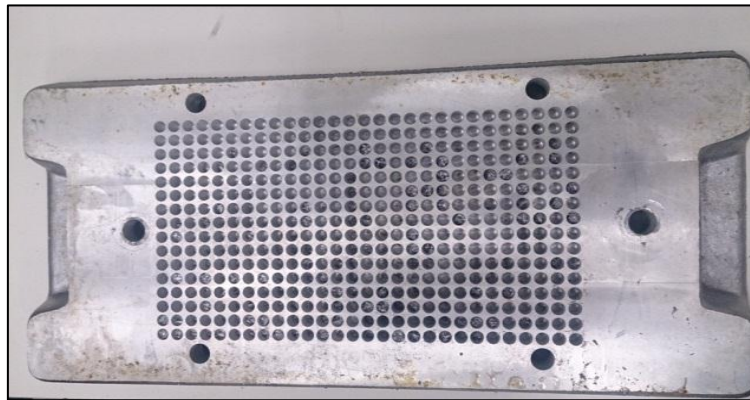
- b) Em intervalos pré-determinados, a furação foi interrompida para:
- ✓ realização de um furo em corpo de prova após 112 furos realizados.
  - ✓ retirada de fotos na posição lateral e frontal da aresta de corte e medição da aresta postíça de corte.
  - ✓ retirada do corpo de prova para verificação de suas medidas, dimensional verificação da circularidade, cilíndricidade e rugosidade.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, foi selecionada uma liga de alumínio com teor de silício variando de 7,5%, a 9,5%, fornecido pela FIAT AUTOMÓVEIS, que está disponível no laboratório de mecânica da PUC MINAS, este material é utilizado no cabeçote do Motor Fire.

A Foto 6 mostra a placa de alumínio utilizada neste trabalho com as seguintes medidas: 495 X 243 X 47 mm. Foram utilizadas um total de 12 placas.

**Foto 6 - Placa de alumínio**



Fonte: Laboratório PUC Minas, 2013.

A Tabela 5 apresenta a composição química da liga de alumínio.

**Tabela 5 - Composição Química da Liga de Alumínio**

Composição detalhada		Liga de Alumínio SAE 323 / A 380
Silício	(Si)	7,5-9,5
Ferro	(Fe)	2.0
Cobre	(Cu)	3,0-4,0
Magnésio	(Mg)	0,10
Manganês	(Mn)	0,50
Níquel	(Ni)	0,50
Zinco	(Zn)	3.0
Estanho	(Sn)	0.35
Total de Outros		0,50
Alumínio	(Al)	Resto

Fonte: Elaborado pelo autor

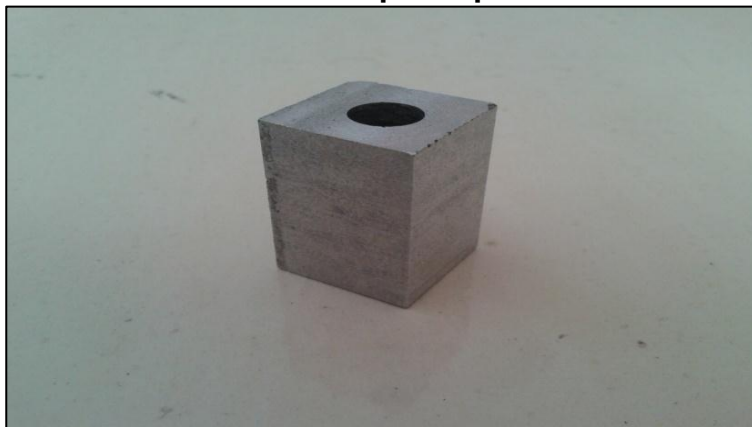
#### 4.1 Parâmetros Geométricos

Para cada broca foram feitos 5 corpos de provas onde foram analisadas as seguintes medidas:

- a) dimensional;
- b) rugosidade; cilindricidade; e
- c) circularidade.

Foram confeccionados um total de 60 corpos de prova como mostra a foto 7, com as seguintes medidas: 25 X 18 X 18 mm.

**Foto 7 - Corpo de prova**



**Fonte: Laboratório PUC Minas, 2013.**

As arestas de corte das brocas foram fotografadas antes da furação e depois de um lote de 112 furos. Foi medido também o material que ficou aderido na aresta de corte da broca. As medidas encontradas estão representadas na Tabela 6.

**Tabela 6 - Medidas da aresta postiça de corte em  $\mu\text{m}$** 

Quantidade de furos	Broca HSS furação com refrigeração 100l/h	Broca HSS furação com MQL 30 ml/h	Broca HSS furação a seco
0	0,0000	0,0000	0,0000
112	0,2200	0,2495	0,3895
224	0,2330	0,2985	0,2205
336	0,2410	0,2465	0,2105
448	0,2455	0,2945	0,4120
Quantidade de furos	Broca MD furação com refrigeração 100l/h	Broca MD furação com MQL 30 ml/h	Broca MD furação a seco
0	0,0000	0,0000	0,0000
112	0,2450	0,2775	0,3620
224	0,2565	0,2130	0,3305
336	0,2630	0,2310	0,5710
448	0,2720	0,1870	0,4260
Quantidade de furos	Broca MD/TiN furação com refrigeração 100l/h	Broca MD/TiN furação com MQL 30 ml/h	Broca MD/TiN furação a seco
0	0,0000	0,0000	0,0000
112	0,1220	0,2480	0,3290
224	0,1290	0,2710	0,4320
336	0,2330	0,2850	0,6010
448	0,0950	0,2220	0,6590
Quantidade de furos	Broca MD/TiNAl furação com refrigeração 100l/h	Broca MD/TiNAl furação com MQL 30 ml/h	Broca MD/TiNAl furação a seco
0	0,0000	0,0000	0,0000
112	0,2380	0,2190	0,3620
224	0,2105	0,2025	0,3305
336	0,2275	0,1945	0,5710
448	0,2765	0,2090	0,2130

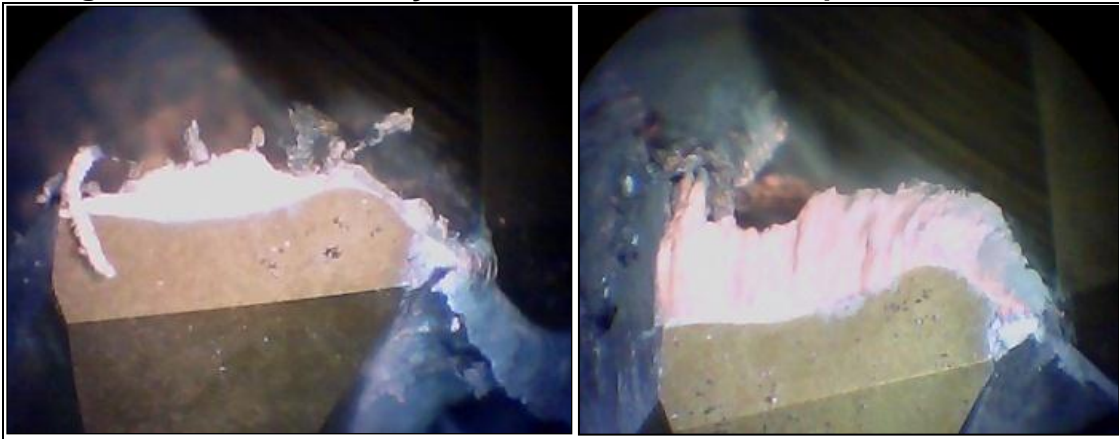
Fonte: Elaborada pelo autor

Em todos os experimentos realizados, verificou-se a excessiva formação de aresta postiça de corte, esse fenômeno é comum na usinagem de ligas com elevada ductilidade. Na Figura 14 é possível observar uma fotografia da ferramenta de metal duro com revestimento de TiN após 448 furos realizados na peça de trabalho. Foram constatados que, desde o primeiro furo, devido à elevada ductilidade da liga conciliada a velocidade de corte de 45 m/min (que é considerada baixa), esses fatores favoreceram ao efeito de desgaste da ferramenta pelo mecanismo de adesão (NOUARI *et al.*, 2005). Vale ressaltar que para esta ferramenta a condição de lubrificação a seco também influenciou na sobreposição de material proveniente da peça sobre a superfície de saída da ferramenta. Dentre as demais condições de lubrificação, verificou-se o desgaste na aresta de corte da ferramenta, porém com menos severidade, indicando que tanto à condição QNF e MQF são, como esperado, importantes para auxiliar na retirada do cavaco, assim como o

resfriamento da região de atrito sobre a zona de cisalhamento secundária da ferramenta, onde se verifica a área de maior desgaste.

A Figura 14 apresenta o material de alumínio aderido na aresta de corte da broca de metal duro revestida de titânio após 448 furos, isto devido a afinidade do alumínio com o revestimento de TiN.

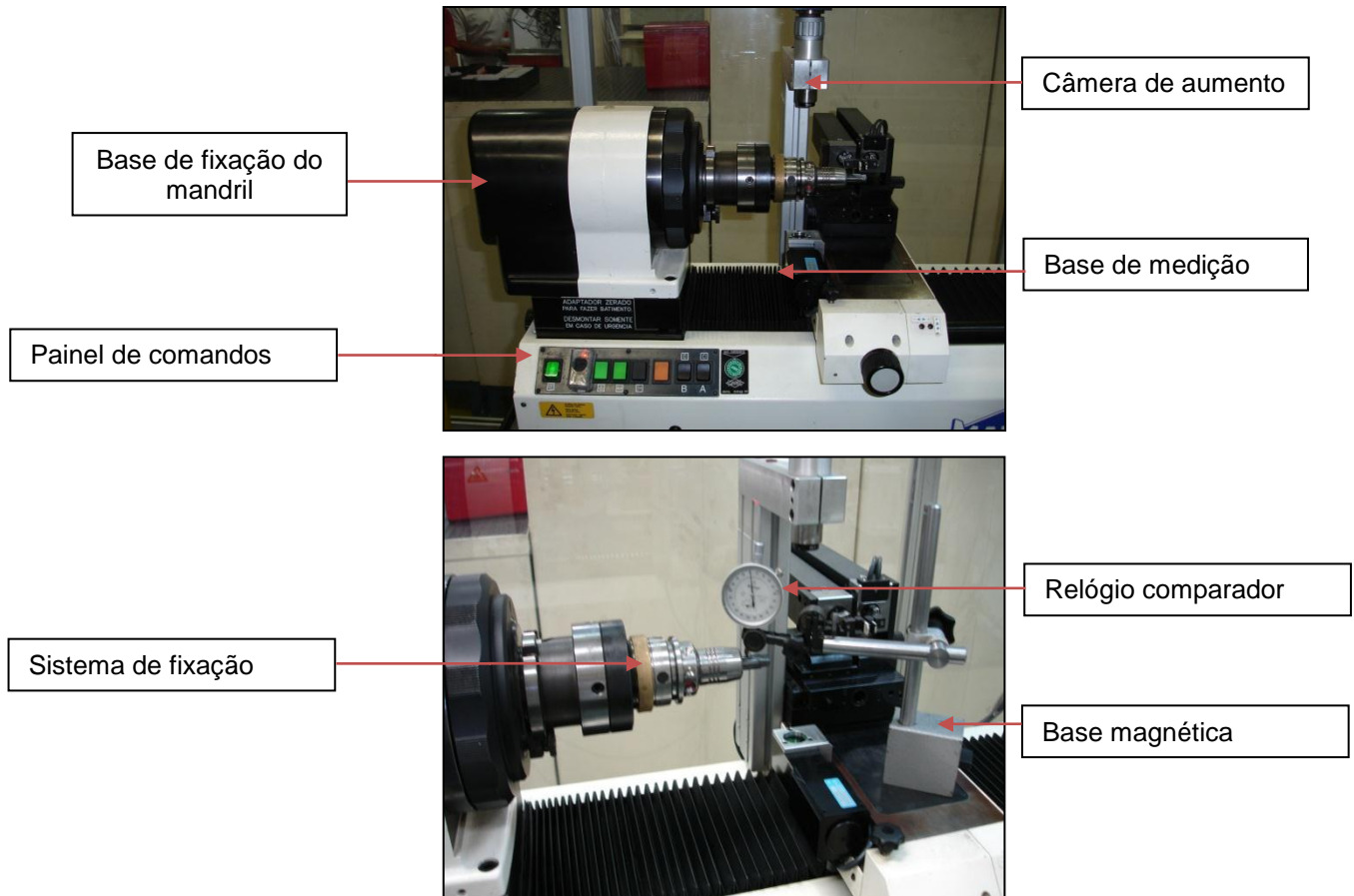
**Figura 14 - Aresta Postiça de corte Broca MD/TiN após 448 furos**



Fonte: Fotografia do autor

Após montagem da broca, esta foi inspecionada visualmente. Mediu-se, em seguida, o erro de batimento radial na haste da broca nos sistemas de fixação hidráulico e térmico na distância correspondente à 127mm da face do cone HSK em relação à ponta da broca através de relógio comparador, marca Mitutoyo, resolução de  $1\mu\text{m}$ , acoplado a uma base magnética (Figura 15).

**Figura 15 - Equipamento de medição do batimento posteriormente à montagem dos sistemas hidráulico e térmico.**



Fonte: Fotografia do autor

A montagem dos sistemas de fixação foi feita manualmente na máquina-ferramenta, marca CNC ROMI BRIDGEPORT - DISCOVERY 560, 3 eixos, comando numérico Siemens, data de fabricação: 28/05/1999, Tensão de alimentação: 24 V, corrente máxima: 1 A, Pressão de alimentação: 8 BAR, Pressão de trabalho: 6 BAR, com taxa de avanço 0,20 mm e velocidade de corte de 45 m/min. Ensaios realizados com ligas de alumínio e alargadores mono cortantes, não apresentaram variações de rugosidade, erro de forma e dimensional do furo com a variação da velocidade de corte (SCHROETER, 1989; ECKHARDT, 1993).

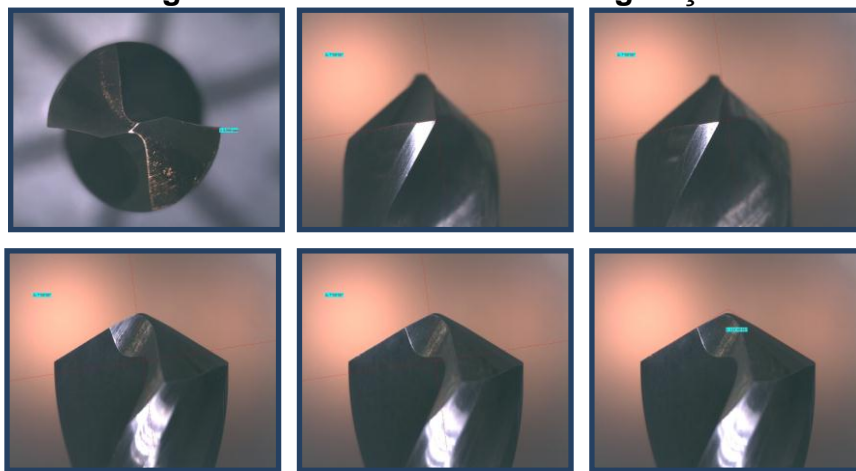
As brocas, após 448 furos, foram colocadas em solução aquosa com 10% de NaOH durante 24 horas. Posteriormente, estas brocas foram fotografadas e analisadas através de um equipamento de medição por projeção de imagem em até

200 X de ampliação. Fonte 220 cabeçote linear em (X e Y), para medição do desgaste e análise do material depositado.

Todas as brocas foram fotografadas, porém nenhuma delas apresentou modificação da aresta de corte.

A Figura 16 mostra a aparência da broca HSS sem refrigeração após 448 furos.

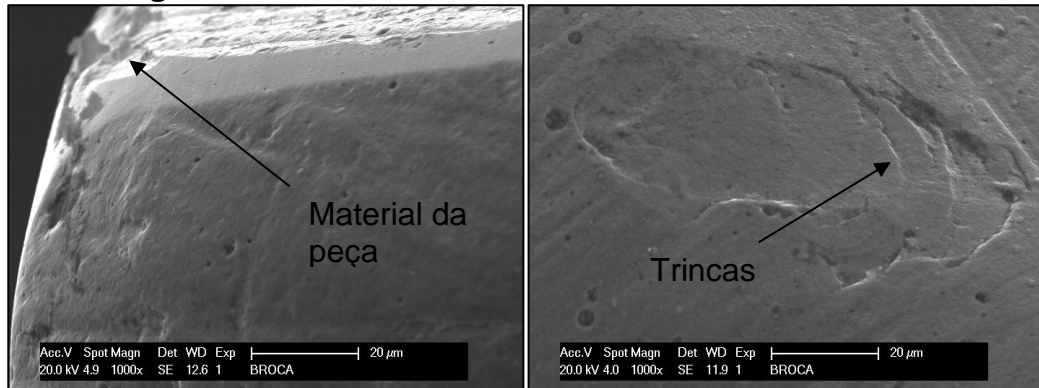
**Figura 16 - Broca HSS sem refrigeração**



Fonte: Fotografia do autor

As duas imagens da Figura 17 foram coletadas da ferramenta de metal duro com revestimento de TiNAl após 448 furos. É possível verificar que mesmo após o processo de decapagem da ferramenta alguns resquícios do material provenientes da peça ainda estavam aderidos à ferramenta. Na Figura 17 (à esquerda) está indicado o material da peça que provavelmente é oriundo da aresta postiça de corte formada sobre a superfície da ferramenta. Este efeito é geralmente causado em baixas velocidades de corte, podendo levar a trincas devido às elevadas tensões localizadas. Em geral, o material aderido encrua-se, se tornando excessivamente rígido. A trinca verificada na Figura 17 (à direita) pode ter sido causada após vários ciclos de encruamento do cavaco sobre a superfície da ferramenta que não suportou a elevada dureza desta porção do material, gerando assim uma fadiga e posteriormente uma trinca.

**Figura 17 - Imagens da ferramenta de metal duro com revestimento de TiNAl**

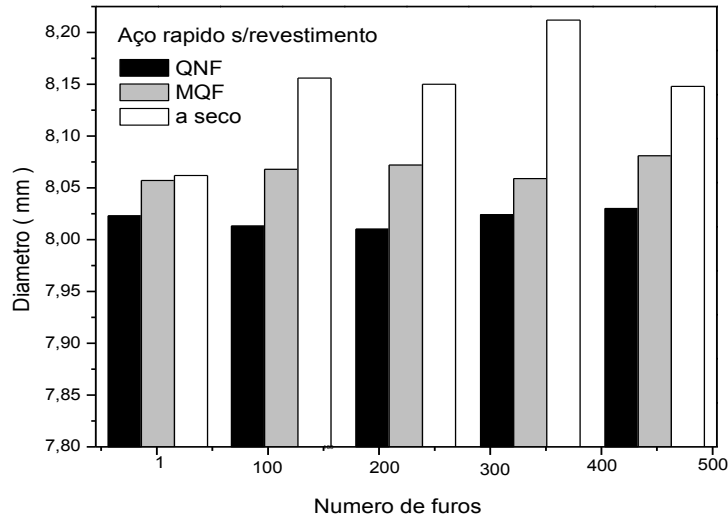


Fonte: Elaborado pelo autor

À esquerda está destacado o material proveniente da peça que mesmo após o processo de decapagem manteve-se sobre a ferramenta. À direita observa-se uma trinca sobre a ferramenta. Ambas as imagens correspondem à mesma ferramenta após 448 furos realizados na liga fundida de alumínio SAE 323 similar a liga de alumínio A380. Segundo Grzesik (2008) o aumento do desgaste da ferramenta provoca aumento na rugosidade na superfície da peça usinada, o que pode justificar os desvios de forma encontrados neste trabalho.

No Gráfico 3 são apresentados os valores das medições do diâmetro em função do número de furos para cada ferramenta nas três condições de lubrificação. É possível perceber que ocorreu um aumento do diâmetro ao longo do aumento de número de furos produzidos, exceto na condição QNF. Na situação MQF ocorreu um aumento gradativo até um número de 336 furos, depois houve uma diminuição do diâmetro quando atingiu 448 furos. O maior aumento de diâmetro ocorreu na condição a seco.

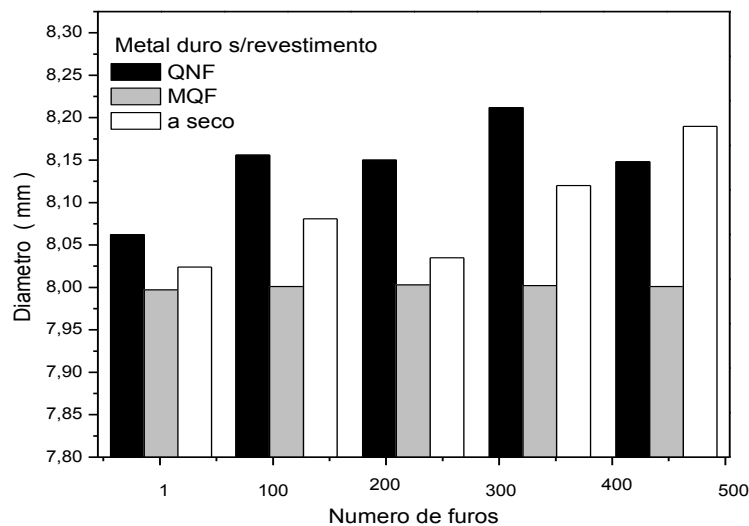
**Gráfico 3 - Diâmetro do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de aço rápido sem revestimento**



Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, no Gráfico 4, são apresentados os valores das medições do diâmetro em função do número de furos para cada ferramenta nas três condições de lubrificação. Percebe-se que a ferramenta de metal duro na condição MQF teve valores de diâmetros menores que a observada na condição a seco.

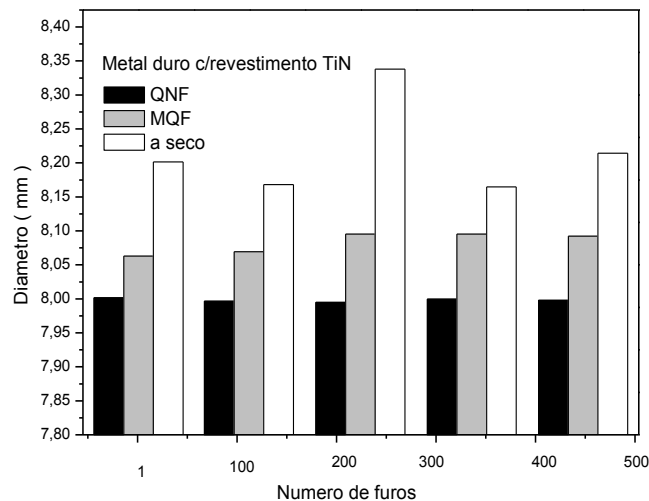
**Gráfico 4 - Diâmetro do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro sem revestimento**



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o Gráfico 5 a seguir, a ferramenta de metal duro revestido apresentou valores de diâmetros relativamente baixos para as condições de QNF e MQF, porém para a condição a seco ocorreu um aumento considerável.

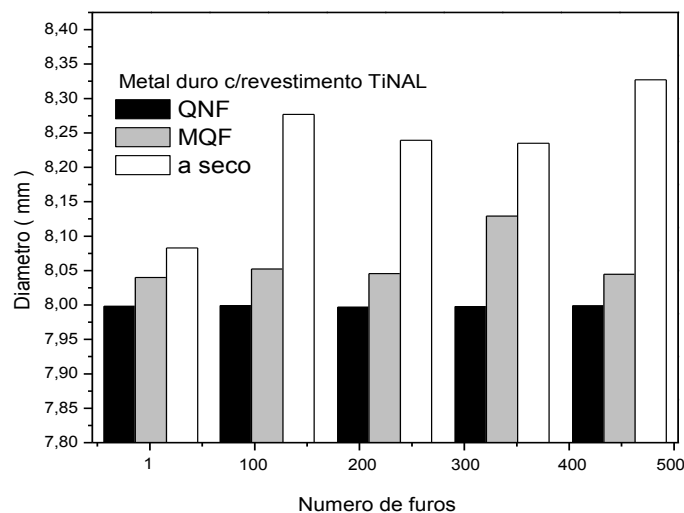
**Gráfico 5 - Diâmetro do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiN**



Fonte: Elaborado pelo autor

A ferramenta de metal duro revestida de TiNAl mostrada no Gráfico 6 apresentou valores de diâmetros relativamente baixos para as condições de QNF e MQF, como aconteceu no Gráfico 5, porém para a condição a seco ocorreu um aumento considerável. Observa-se uma coerência no desempenho homogêneo das brocas de metal duro com revestimento de TiN

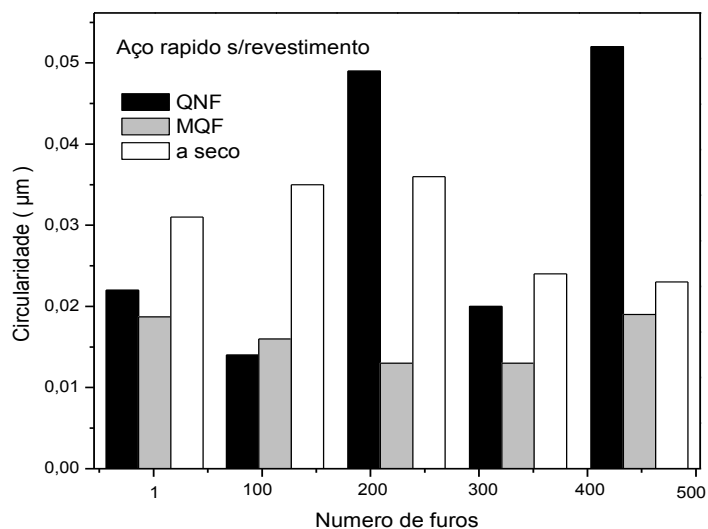
**Gráfico 6 - Diâmetro do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiNAl**



Fonte: Elaborado pelo autor

São apresentados no Gráfico 7 a seguir os valores das medições da circularidade em função do número de furos para cada ferramenta nas três condições de lubrificação. A condição QNF apresenta um alto valor de desvio de circularidade e apresenta também altos valores na condição MQF com 224 furos e 448 furos. O melhor desvio de circularidade ocorreu na condição MQF. Para condição a seco a broca de metal duro sem revestimento apresentou alto desvio de circularidade quando comparado com as situações QNF e MQF, porém houve um aumento elevado para a condição QNF com 448, fato este que não era esperado. Pode-se notar que a condição a seco aumenta consideravelmente o valor do desvio de circularidade.

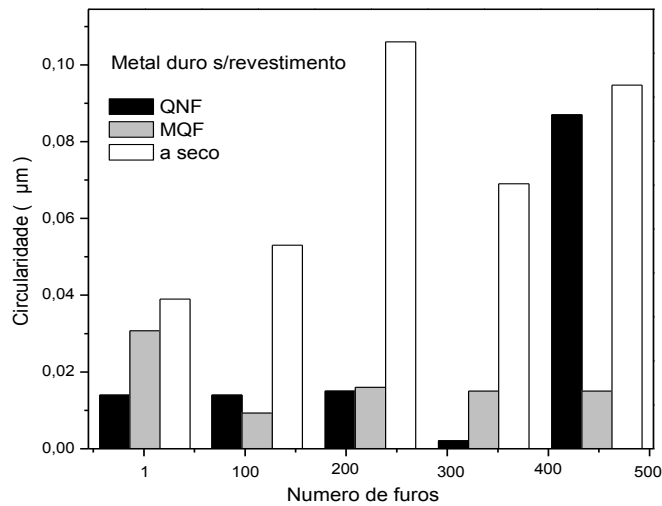
**Gráfico 7- Circularidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de aço rápido sem Revestimento**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

No Gráfico 8 é mostrado os valores das medições da circularidade em função do número de furos para a ferramenta de metal duro sem revestimento nas três condições de lubrificação. A condição QNF apresenta um alto valor de desvio de circularidade e apresenta também altos valores na condição MQF com 224 furos e 448 furos. O melhor desvio de circularidade ocorreu na condição MQF. Para condição a seco a broca de metal duro sem revestimento apresentou alto desvio de circularidade quando comparado com as situações QNF e MQF, porém houve um aumento elevado para a condição QNF com 448, fato este que não era esperado. Pode-se notar que a condição a seco aumenta consideravelmente o valor do desvio de circularidade.

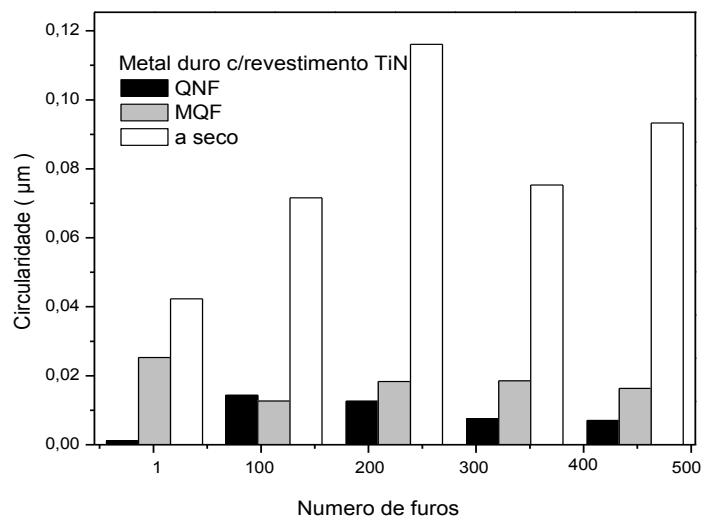
**Gráfico 8 - Circularidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro sem Revestimento**



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a broca de metal duro com revestimento de TiN a seguir, são apresentados os valores das medições de desvio da circularidade em função do número de furos nas três condições de lubrificação. No Gráfico 9 é possível perceber que ocorreu um aumento de desvio da circularidade alto na furação a seco. A condição QNF e MQF apresentaram valores relativamente baixos para a broca de metal duro com revestimento de TiN.

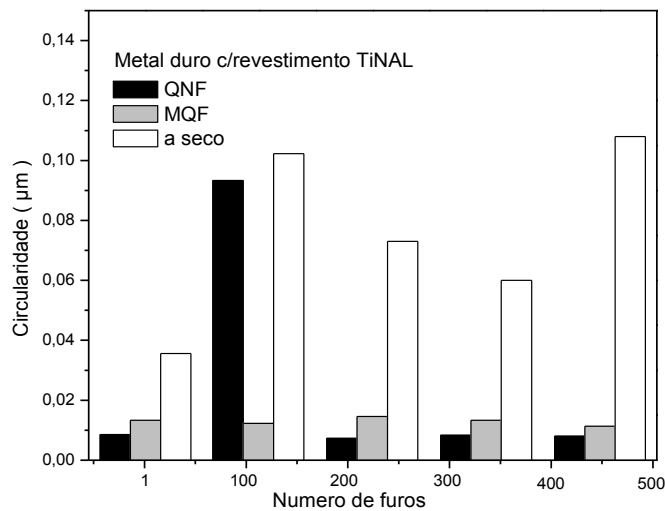
**Gráfico 9 - Circularidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiN**



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a broca de metal duro com revestimento de TiNAl, é mostrado no Gráfico 10 a seguir, os valores das medições de desvio da circularidade em função do número de furos para cada ferramenta nas três condições de lubrificação. É possível perceber que ocorreu um aumento de desvio da circularidade alto na furação a seco. A condição QNF e MQF apresentaram valores relativamente baixos para a broca de metal duro com revestimento TiNAl, mas apresentou um valor alto na quantidade de 224 furos, fato este que não era esperado.

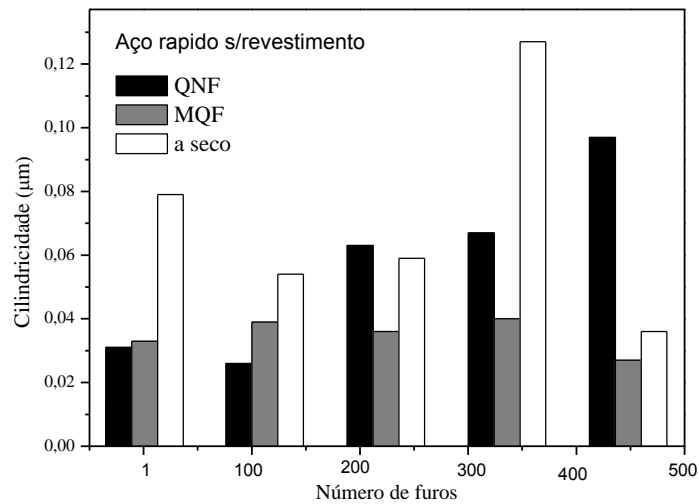
**Gráfico 10- Circularidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiNAl**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

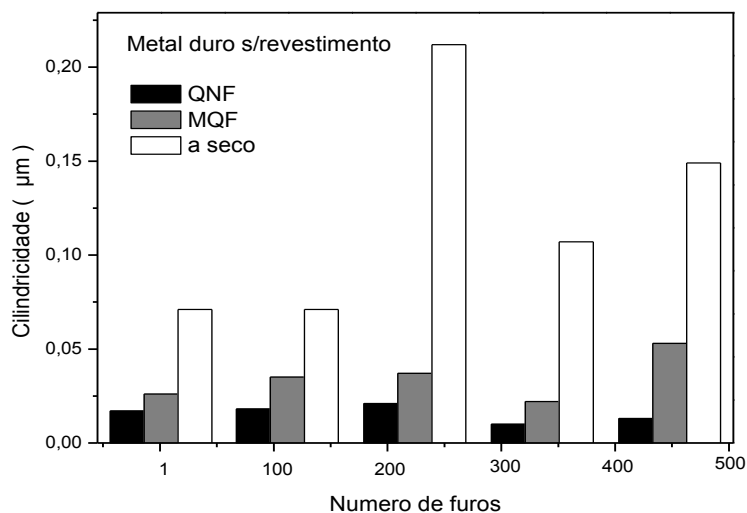
O gráfico 11 apresenta os valores das medições da cilindricidade em função do número de furos para cada ferramenta nas três condições de lubrificação. Nota-se que ocorreu um aumento da cilindricidade ao longo do aumento de número de furos com uma relativa coerência até 336 furos produzidos, tanto na situação de QNF, MQF e a seco. Porém, em 448 furos ocorreu uma inversão de efeito da eficiência da lubrificação.

**Gráfico 11- Cilindricidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de aço rápido sem revestimento**



No Gráfico 12 a ferramenta de metal duro na condição QNF atuou com as menores dispersões de desvios de forma. Enquanto que para a condição MQF, ocorreu um pequeno aumento do mesmo após 336 furos, e de maneira mais acentuada na condição a seco. É válido ressaltar, que as ferramentas de aço e metal duro possuem comportamentos diferentes nas condições de corte escolhidas, visto que a condução térmica do aço rápido, e do metal duro é diferente, assim como, as suas propriedades mecânicas de dureza e tenacidade. Estes fatores podem ter influenciado na usinagem da liga.

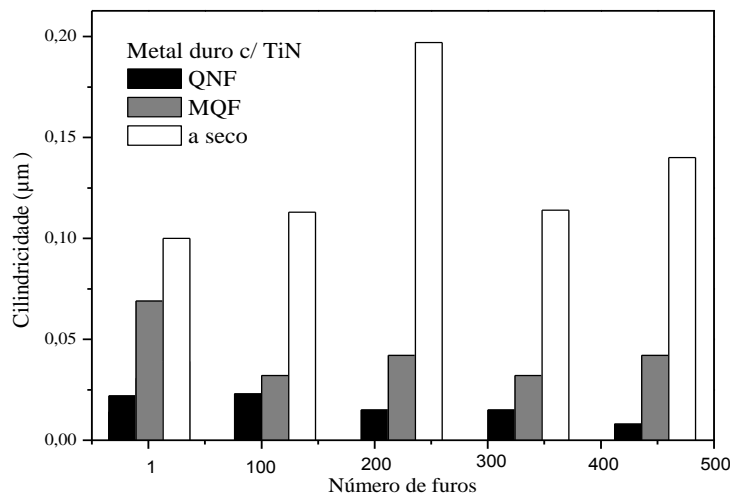
**Gráfico 12 - Cilindricidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de aço rápido sem revestimento**



Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 13, a ferramenta de metal duro revestido apresentou valores de desvios de forma baixos, o que indica a eficiência do revestimento na redução de atrito durante o processo de furação, o que já é amplamente conhecido. O fato que chamou a atenção consistiu na observação do desempenho estável do revestimento de TiN ao longo dos 448 furos, com uma pequena dispersão em 224 furos na condição à seco. Enquanto que no revestimento de TiNAl, após 336 furos o aumento é mais do que o dobro das medidas em 224 furos para as condições MQF e a seco.

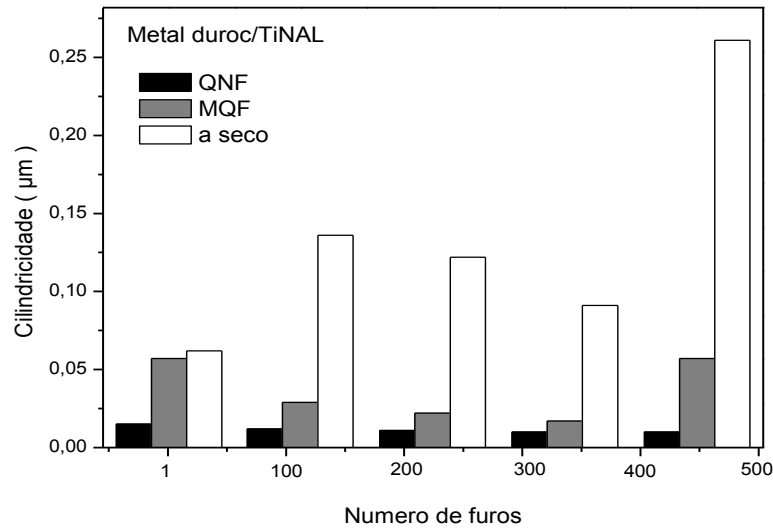
**Gráfico 13 - Cilindricidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiN**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

Considerando o Gráfico 14, a ferramenta de metal duro com revestimento de TiNAl apresentou valores de desvios de forma baixos, o que indica a eficiência do revestimento na redução de atrito durante o processo de furação, o que já é amplamente conhecido. Porém, após 336 furos o aumento é mais do que o dobro das medidas em 224 furos para as condições MQF e a seco.

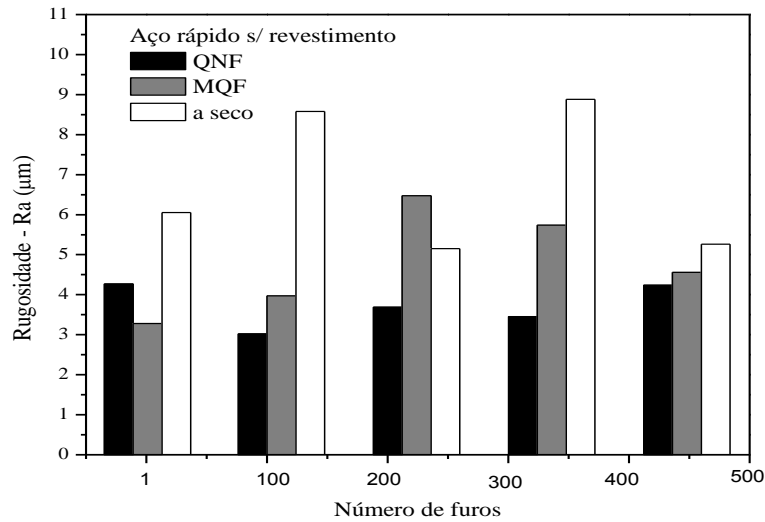
**Gráfico 14 - Cilindricidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiNAl**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

Na sequência, são apresentados os valores das medições da rugosidade aritmética ( $R_a$ ) em função do número de furos para cada ferramenta nas três condições de lubrificação. No Gráfico 16a condição MQF não foi suficiente para manter os valores de  $R_a$  abaixo de  $4 \mu\text{m}$  após o primeiro furo produzido. Assim como no Gráfico 11, na condição a seco em 448 furos ocorreu uma redução de valores em relação à 336, fato este que não era esperado. Ao se comparar as ferramentas, ambas sem revestimento, porém com materiais de propriedades mecânicas diferentes, é possível perceber que na condição MQF os valores de rugosidade são semelhantes, em torno de  $5 \mu\text{m}$ . Porém, é nítida que a condição a seco prejudica o corte do material da liga pelo metal duro da ferramenta. Isso, provavelmente, ocorre devido a uma combinação de fatores que vão desde a formação de excessiva APC, o acúmulo de cavaco no canal da ferramenta, e possivelmente uma variação e aumento do coeficiente de atrito entre a peça e a ferramenta.

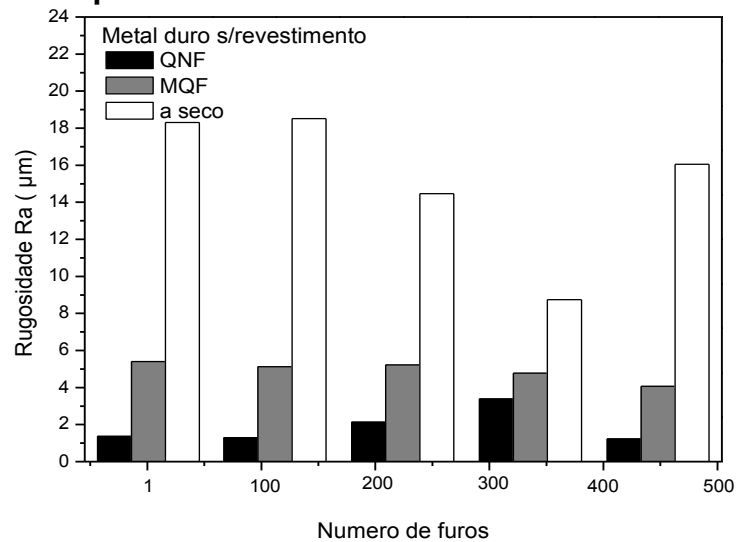
**Gráfico 15 - Rugosidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de aço rápido sem revestimento**



**Fonte: Elaborado pelo autor**

No Gráfico 16 são apresentados os valores das medições da rugosidade média (Ra) em função do número de furos para cada ferramenta nas três condições de lubrificação. A condição MQF também não foi suficiente para manter os valores de Ra abaixo de 4  $\mu\text{m}$  após o primeiro furo produzido. Assim como no Gráfico 15, na condição a seco em 448 furos ocorreu uma redução de valores em relação a 336. Ao se comparar as ferramentas, ambas sem revestimento, porém com materiais de propriedades mecânicas diferentes, é possível perceber que na condição MQF os valores de rugosidade são semelhantes, em torno de 5  $\mu\text{m}$ . Porém, é nítida que a condição a seco prejudica o corte do material da liga pelo metal duro da ferramenta. Isso provavelmente ocorre devido à uma combinação de fatores que vão desde a formação de excessiva APC, o acúmulo de cavaco no canal da ferramenta, e possivelmente uma variação e aumento do coeficiente de atrito entre a peça e a ferramenta.

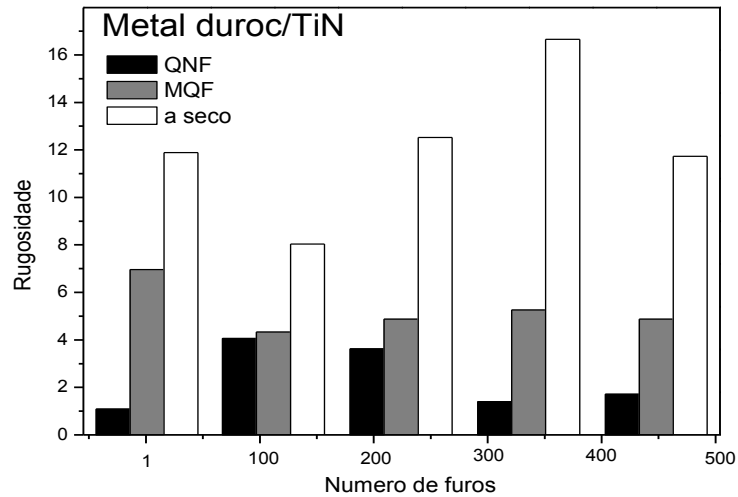
**Gráfico 16 - Rugosidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de MD sem revestimento**



Fonte: Elaborado pelo autor

O Gráfico 17 a seguir, o revestimento não apresentou significantes diferenças entre os valores medidos. Verificou-se que na condição QNF para a ferramenta de metal duro com revestimento TiN em 112 e 224 furos os valores de Ra, próximos a 4 µm foram um pouco maiores que os demais. Com isso, percebeu-se que para os interrompimentos seleccionados a cada 112 furos, algum fenômeno deve estar ocorrendo e que precisa ser melhor entendido. Mais uma vez, percebeu-se que a condição a seco é extremamente dispendiosa em termos de acabamento da superfície devido aos elevados valores de Ra encontrados para todas as condições de lubrificação independente da ferramenta utilizada.

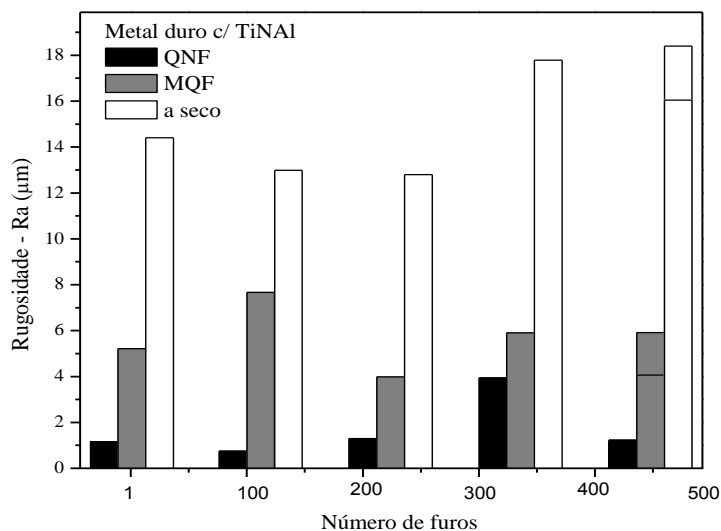
**Gráfico 17 - Rugosidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiN**



Fonte: Elaborado pelo autor

A ferramenta apresentada no Gráfico 18 mostra que o revestimento não apresentou significantes diferenças entre os valores medidos. Verificou-se também que na condição QNF para a ferramenta de metal duro com revestimento TiNAl em 112 e 224 furos os valores de Ra, próximos a 4  $\mu\text{m}$  foram um pouco maiores que os demais. Novamente, constatou-se que a condição a seco é extremamente dispendiosa em termos de acabamento da superfície devido aos elevados valores de Ra encontrados para todas as condições de lubrificação independente da ferramenta utilizada.

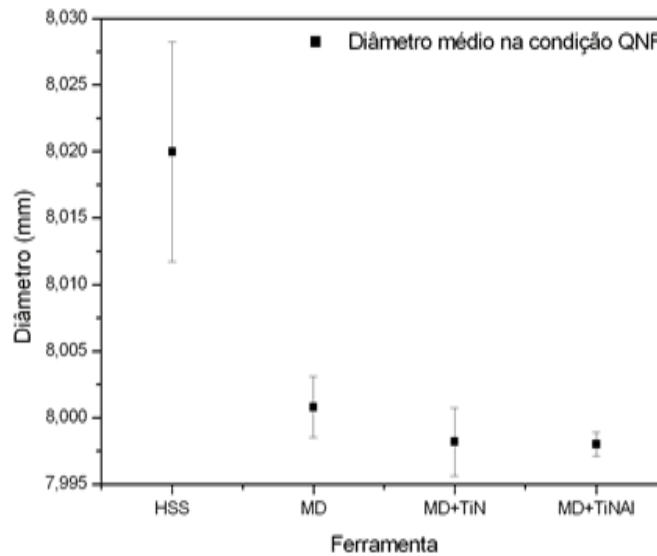
**Gráfico 18 - Rugosidade do furo em função do número de furos produzidos pela ferramenta de metal duro com revestimento de TiNAl.**



Fonte: Elaborado pelo autor

O Gráfico 19 mostra que o menor desvio de diâmetro na condição QNF ocorreu com a broca de MD revestida com TiNAL e o maior desvio com a broca de HSS.

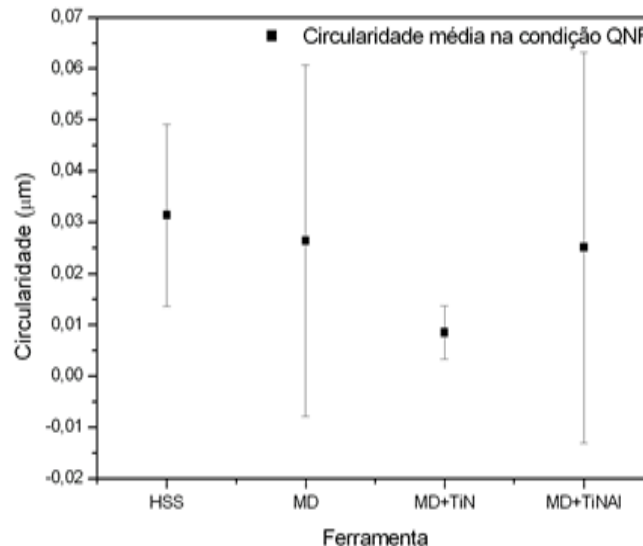
**Gráfico 19 - Dispersão do diâmetro do furo em função do número de furos produzidos com refrigeração QNF**



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao Gráfico 20, este mostra também que o menor desvio de circularidade na condição QNF ocorreu com a broca de MD revestida com TiN, sendo que os valores para a broca de MD sem revestimento e MD com revestimento de TiNAL foram acima dos resultados esperados.

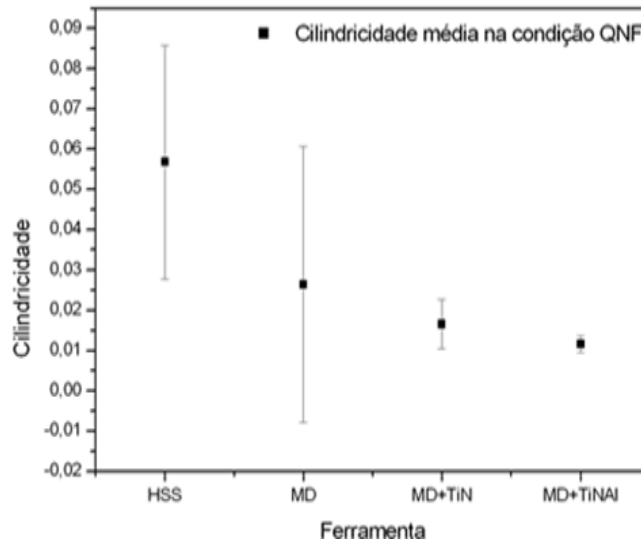
**Gráfico 20 - Dispersão da circularidade em função do número de furos produzidos com refrigeração QNF.**



Fonte: Elaborado pelo autor

O Gráfico 21, a seguir, representa o menor desvio de cilindricidade na condição QNF ocorreu com a broca de MD revestida com TiNAL, para os valores de HSS e MD os valores foram maiores, resultado que já era previsto.

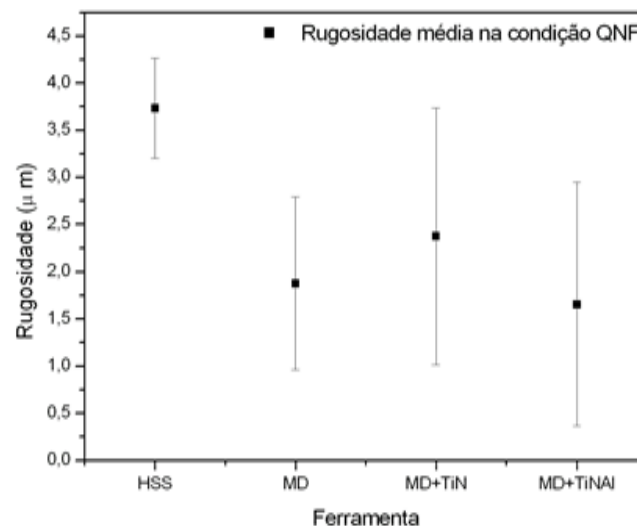
**Gráfico 21 - Dispersão da cilindricidade em função do número de furos produzidos com refrigeração QNF.**



Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando o Gráfico 22, a seguir, este apresenta o menor desvio de rugosidade com QNF que ocorreu com a broca de HSS, porém os menores valores ocorreram com a broca de MD revestida de TiNAL.

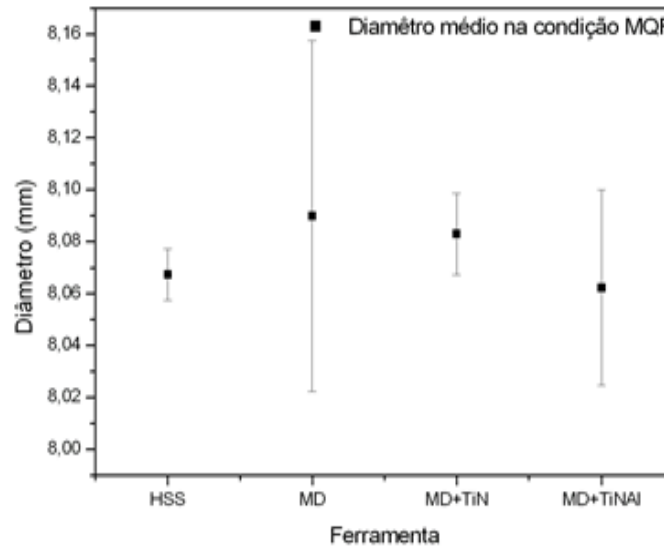
**Gráfico 22 - Dispersão da rugosidade em função do número de furos produzidos com refrigeração QNF.**



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o gráfico 23, percebe-se que o menor desvio de diâmetro com refrigeração MQF ocorreu com a broca de HSS, porém os menores valores ocorreram com a broca de MD revestida de TiNAl.

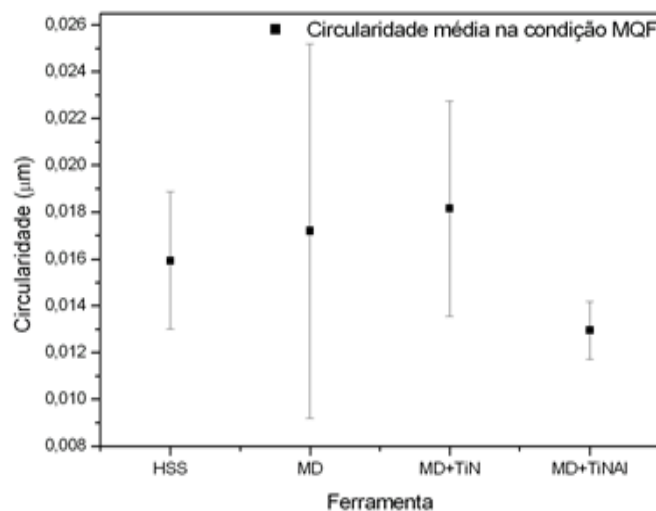
**Gráfico 23 - Dispersão do diâmetro em função do número de furos produzidos com refrigeração MQF.**



Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 24, está representado o menor desvio de circularidade com refrigeração MQF que ocorreu com a broca de MD revestida de TiNAl, e o maior valor de desvio ocorreu com a broca de MD sem revestimento.

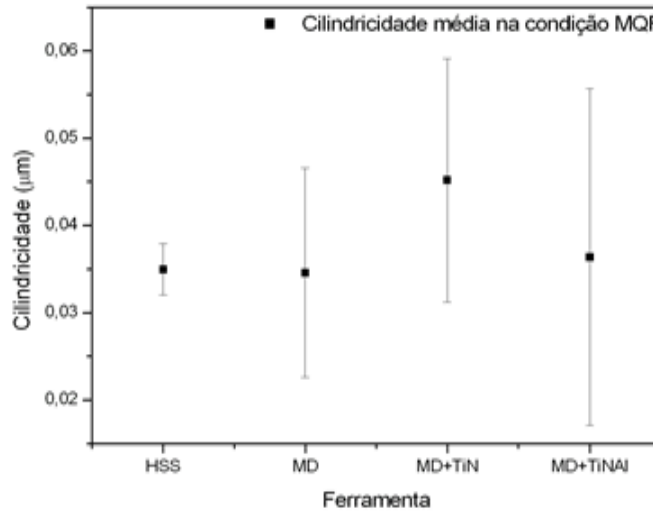
**Gráfico 24 - Dispersão da circularidade em função do número de furos produzidos com refrigeração MQF.**



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao Gráfico 25, este mostra o menor desvio de cilindridade com refrigeração MQF ocorreu com a broca de HSS sem revestimento e a maior dispersão correu com a broca de MD revestida de TiNAL, fato esse que não era esperado.

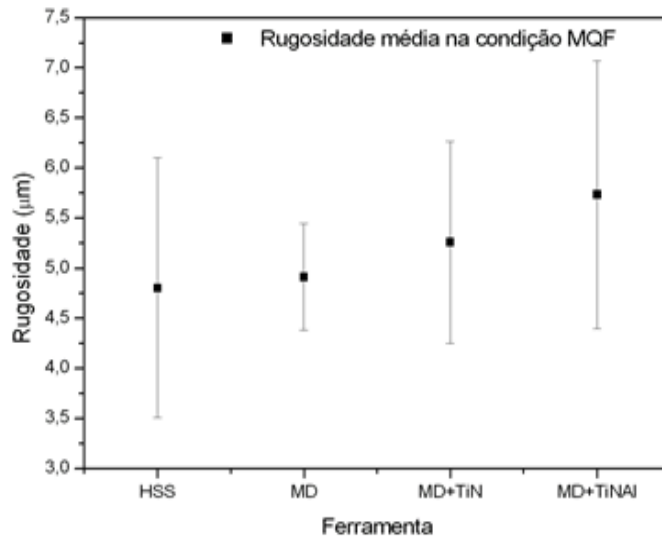
**Gráfico 25 - Dispersão da circularidade em função do número de furos produzidos com refrigeração MQF.**



Fonte: Elaborado pelo autor

Já no Gráfico 26 percebe-se o menor desvio de rugosidade com refrigeração MQF ocorreu com a broca de MD sem revestimento e as maiores dispersões ocorreram com as brocas de HSS sem revestimento e MD revestida de TiNAL.

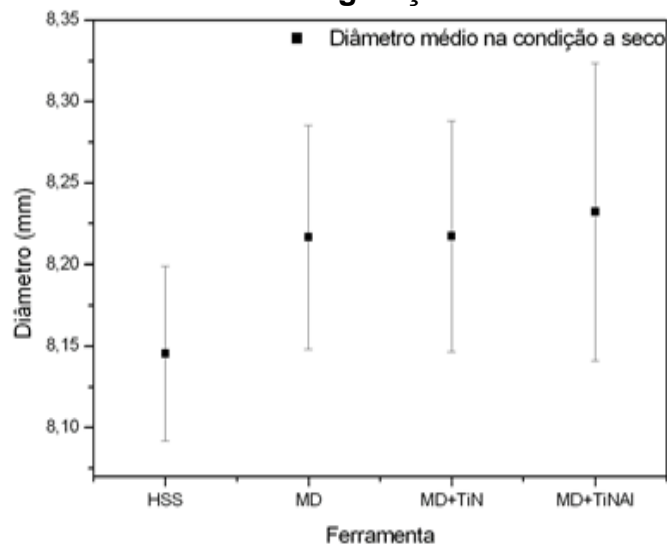
**Gráfico 26 - Dispersão da rugosidade em função do número de furos produzidos com refrigeração MQF.**



Fonte: Elaborado pelo autor

O Gráfico 27 mostra que o menor desvio de diâmetro sem refrigeração (a seco) ocorreu com a broca de HSS sem revestimento e a maior dispersão ocorreu com a broca MD revestida de TiNAl.

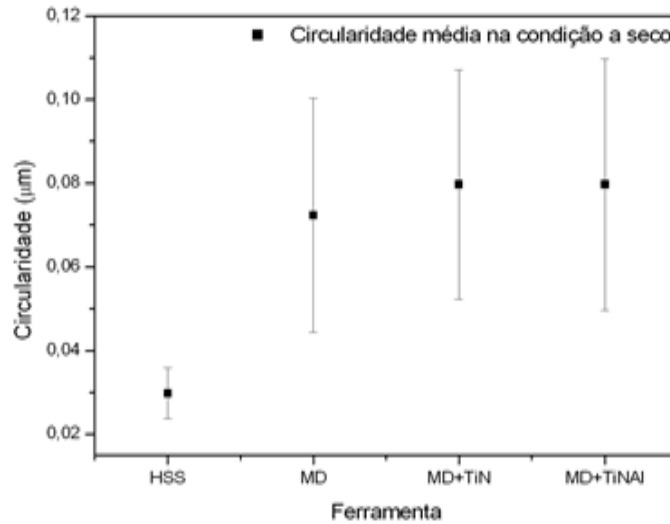
**Gráfico 27 - Dispersão do diâmetro em função do número de furos produzidos sem refrigeração.**



Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 28, a seguir, mostra que o menor desvio de circularidade sem refrigeração (a seco) ocorreu com a broca de HSS, enquanto as brocas de MD sem revestimento, MD com revestimento de TiN e MD com revestimento de TiNAl apresentaram os maiores valores de dispersões.

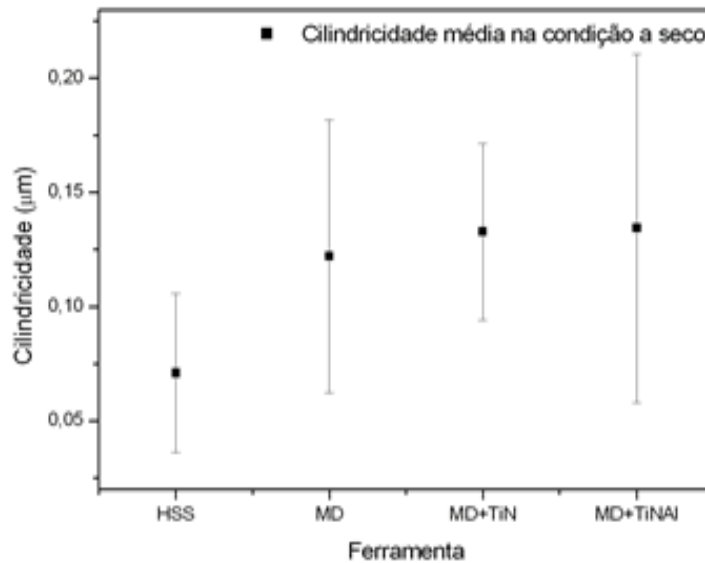
**Gráfico 28 - Dispersão da circularidade em função do número de furos produzidos sem refrigeração.**



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o Gráfico 29, percebe-se o menor desvio de cilindricidade sem refrigeração (a seco) ocorreu com a broca de HSS, enquanto as brocas de MD sem revestimento, MD com revestimento de TiN e MD com revestimento de TiNAl apresentaram os maiores valores de dispersões, como aconteceu no gráfico da figura 28.

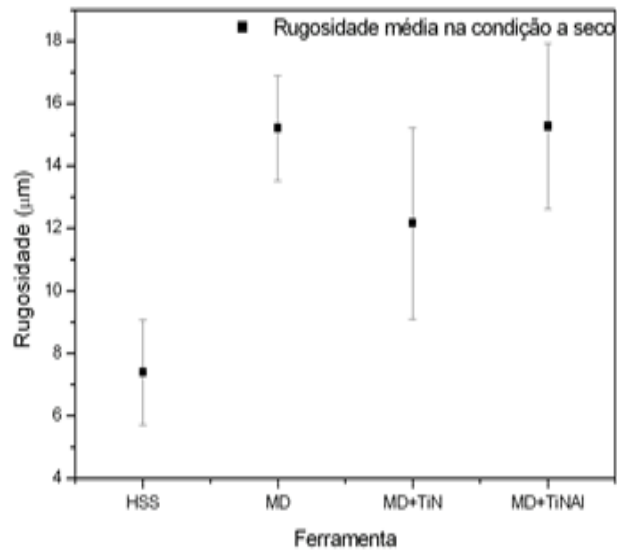
**Gráfico 29 - Dispersão da cilindricidade em função do número de furos produzidos sem refrigeração.**



Fonte: Elaborado pelo autor

O Gráfico 30 apresenta os menores desvios de rugosidade sem refrigeração (a seco) ocorridos com as brocas de HSS sem revestimento e MD sem revestimento, enquanto as brocas de MD com revestimento de TiN e MD com revestimento de TiNAl apresentaram os maiores valores de dispersões.

**Gráfico 30 - Dispersão da rugosidade em função do número de furos produzidos sem refrigeração.**



Fonte: Elaborado pelo autor

## 4 CONCLUSÕES

Assim como é amplamente conhecido os revestimentos de TiN e TiNAl auxiliam na manutenção da geometria da ferramenta mesmo após um longo processo de trabalho. E, isso foi comprovado através das medidas indiretas dos desvios de forma do furo produzido. A formação da aresta postiça de corte independe da ferramenta e da condição de lubrificação do par peça/ferramenta no momento do corte. Não foi constatado uma significativa alteração dos valores medidos de cilindridade e rugosidade quanto à condição de lubrificação em quantidade normal de fluido (QNF) e em mínima quantidade de fluido (MQF). Porém, na usinagem a seco verificou-se a inviabilidade do processo nessas condições.

O erro de batimento não apresentou evolução consistente com o número de peças usinadas para o sistema de fixação hidráulico e também não interferiu nas dimensões dos furos obtidos.

Observou-se que as Brocas de MD tiveram os valores dispersão da cilindridade e circularidade menores que as brocas de HSS. A rugosidade mais alta foi verificada na furação a seco com a broca HSS comparadas com as brocas de MD, MD/TiN, MD/TiNAl.

Os parâmetros geométricos com refrigeração QNF foram melhores comparados com a refrigeração MQF.

A menor rugosidade foi verificada na furação com a broca de MD, na situação QNF e MQF.

## 5 TRABALHOS FUTUROS

Estudar a furação de ligas Al-Si com brocas de HSS sem refrigeração e brocas de metal duro sem revestimento e revestidas com TiN e TiNAl, variando as velocidades de corte de 30m/s e 60 m/s.

Estudar a comparação e correlação referente à avaliação de desgaste de broca e os seus mecanismos.

Avaliar a influência dos parâmetros de corte com refrigeração QNF, MQF e a seco com velocidades de corte de 30m/s e 60m/s.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6176: Brocas helicoidais. Terminologia. Rio de Janeiro, 1976.

ADLER, D. P. *et al.* Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns. **Machining Science and Technology**, v. 10, n. 1, p. 23-58, 2006.

ARMAREGO, E. J. A.; BROWN, R. H, **The Machining of Metals**. New Jersey. Prentice Hall, pp. 2-9 e 96-119, 1967.

AVRAM, Loan; XIROUCHAKIS, Paul. Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system. **Journal of Cleaner Production**, v.19, n.6-7, Apr./May, p. 699-711, 2011.

BAĞCI, Eyup; OZCELIK, Babur. Investigation of the effect of drilling conditions on the twist drill temperature during step-by-step and continuous dry drilling **Materials & Design**, v. 27, n. 6, p. 446-454, 2006.

BRAGA, D.U *et al.* **Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloys** Journal of Materials Processing Technology , n.122, p.127-138, 2002.

BATZER, S.A. *et al.* Chip morphology and hole surface texture in the drilling of cast Aluminum alloys, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 79, n. 1, 1 July., p. 72-78, 1998.

BRINKSMEIER, E.; DIERSEN, P.; ZILLMER, A.; JANSSEN, R. Cooling Lubrication Reduction when Machining Advanced Materials. **Journal of Engineering Manufacture**, v. 213, n. 8, p. 769-778, 1999.

CANADA Metal. **Aluminum**. 2013. Disponível em: < <http://www.canmet.com/content/resources/alloy-aluminum.htm>> Acesso em: 29 maio 2014.

COSTA, E. S.; SILVA, R. B. da; MACHADO, A. R. Comparação do erro de cilindricidade e rugosidade na usinagem de furos cegos e passantes em função de diferentes sistemas lubri-refrigerantes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4., 2007, Águas de São Pedro. **Anais...** Águas de São Pedro: ABCM, 2011. p. 1-10.

COTTERELL, M.G.; KELLY, J.F. Minimal lubrication machining of aluminium alloys. **Journal of Materials Processing Technology** , n., 120, p 327-334, 2002.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: MM Editora, 1999.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Editora Artliber, 2008.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 2.ed. São Paulo: ArtLiber, 2000.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2005.

DRAGANESCU, F.; GHEORGHE, M.; DOICIN, C.V..Models of machine tool efficiency and specific consumed energy.**Journal of Materials Processing Technology**, v. 141, n. 1, p. 9-15, Oct., 2003.

ECKHARDT, M.; **Utilização de alargadores de gume único regulável para a obtenção de furos de precisão**. 1993. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica.

ESTRIN, Y. *et al.* Ultrafine grained aluminium alloys: processes, structural features and properties. In: LUMLEY, R. (Ed.). **Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications**. Cambridge: Wood headPublishingLtd.,2010, p. 468–503

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher. 1977.

GONÇALVES JÚNIOR, Armando Albertazzi. **Apostila de metrologia** - parte I, Labmetro. Santa Catarina: UFSC, 2001.

GRZESIK, W. **Advanced machining processes of metallic materials: theory, Modelling and Applications** Elsevier, handbook, 2008.

HANYU, H. *et al.* Dry and semi-dry machining using finely crystallized diamond coating cutting tools. **Surface and Coatings Technology**, v. 173-174, p. 992–995, 2003.

HASIB, M. A.; AL-FARUK, A.; AHMED, N. Mist application of cutting fluid. **International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering**, v. 10, n. 4, p. 13-18, 2010.

HE, Y. *et al.* Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: part B: **Journal of Engineering Manufacture**, v. 226, n. 2, p. 255-266, 2012.

HUANG, B. W. Dynamic characteristics of a drill in the drilling process. **Journal of Engineering Manufacture February**, v. 217, n. 2, p. 161-167, 2008.

JACK, D.H. Sandvik Hard Materials Ltd, P 0 Box 109, Torrington Avenue Coventry. **Materials & Design**, v. 7, n. 5, p. 267-273, Sept.-Oct. 1986.

KALIDAS, Shiva; DEVOR, Richard E.; KAPOOR, Shiv G. Experimental investigation of the effect of drill coatings on hole quality under dry and wet drilling conditions. **International Journal of Surface and Coatings Technology**, v. 148, n. 2-3, Dec., p. 117-128, 2001.

KANGA, Myung Chang; KIMA, Jeong Suk; KIMB, Kwang Ho. Fractal dimension analysis of machined surface depending on coated tool wear. **Surface & Coatings Technology**, v. 193, n. 1-3, 26 August., p. 259-265, 2005.

KAWASAKI, M.; LANGDON, T.G. Principles of Super plasticity in Ultrafine-Grained Materials. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 1782-1796, 2007.

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G., Presented at the Opening Session Dry Cutting CIRP. **Annals**, v. 46, n.2, p 519-526, 1997.

KOLE, A. T. *et al.* **Metal mecânica: teoria caminhão betoneira**. São Paulo: SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 1997.

KÖNIG, W., KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren**. 5 ed. Berlin: Springer, 1997, 471 p.

KOPAC, J.; SALI, S. Acoustic emission in drilling carbon steel and nodular gray iron. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 19, Issue: 1, p. 91-95, 2006.

KRESS, D. EL., **Escariado con altas velocidades**. Stuttgart.1974. Tese (Doutorado) - Universidad de Stuttgart.

KURT, M.; KAYNAK, Y.; BAGCI, E. Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy, International. **Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 37, n. 11-12, p. 1051-1060, 2008.

LEYENDECKER, T. *et al.* TiAlN-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> PVD-Multilayer for metal cutting operation **Surface and Coatings Technology**, v. 97, n.1, Dec. p. 790-793, 1997.

LISTA, G. *et al.* Wear behaviour of cemented carbide tools indry machining of aluminium alloy. v. 259, n. 7-12, July./Aug., p. 1177-1189, 2005.

MCCOSH, K.; SWACO, M. Unique electrophoresis technology to recycle invertemulsion drilling fluids. **IPEC - Power Engineering Conference**, p. 1-15, 2007.

MACHADO, Alisson, Rocha; SILVA, Márcio B.. **Usinagem dos metais**. 4. ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, abr. 1999.

MARCONDES, F.C. **A história do metal duro**. São Paulo: Sandvik Coromant.,CPA, Consultoria de Projetos e Artes, 1990.

NAYEBI, A.; VAGHEFPOUR, H. Thermovisco plastic modelling of drilling: twist drills. **Journal of Engineering Manufacture**, v. 222, n. 3, p. 403-412, 2008.

NEWMAN, S.T. *et al.* Energy efficient process planning for CNC machining. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 5, n. 2, p. 127-136, 2012.

NOUARI, M. *et al.* Effect of Machining Parameters and Coating on Wear Mechanisms in Dry Drilling of Aluminium Alloys., Int. **Journal. Of Mach. Tools and Manufac**, v. 45, p. 1436-1442, 2005.

NOVASKI, O. **Contribuições ao processo de furação com brocas helicoidais**. 1996. 153f. Tese (Livre docência)- Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1996.

OKASHA, M. M.; MATIVENGA, P. T.; DRIVER, N.; LI, L. Sequential LASER and mechanical micro-drilling of Ni super alloy for aerospace application. In: CIRP - THE INTERNATIONAL ACADEMY FOR PRODUCTION ENGINEERING, 2010, Paris. **Annals...** Paris, 2010. p. 199-202.

OLIVEIRA, Claudinei José de. **Avaliação da influência de sistemas de filtragem aplicados à topografia de superfície em usinagens**. 2004. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

OLIVEIRA, Claudinei José de; PALMA, Ernani Sales; SALES, Wisley Falco. **Sensibilidade na análise de forma em função da quantidade de harmônicas por revolução**. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobef/2007/files/091006255.pdf>> Acesso em: 26 jun. 2013.

PAUL, Anish; KAPOOR, Shiv G.; DEVOR, Richard E. Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill point design. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 4-5, Apr., p. 421-431, 2005.

PATIL, R. Y. High Cutting tool wear-mechanisms. **Advances Journal of Science, Engineering & Technology Management**, v. 2, n. 1, p. 38-42, 2008.

PETCH, N J. The cleavage strength of poly crystals. **I Iron Steel Inst**, v.174, p.25-28, 1953.

POLMEAR, I.J. **Light alloys**: metallurgy of the light metals. London: Arnold, 1995.

PRENGEL, H.G.; *et. al.* Advanced PVD-TiAlN coatings on carbide and cermet cutting tools. **Surface and Coatings Technology**, v. 94-95, p. 597-602, 1997.

RAHMAN, A. A.; MAMAT, A.; WAGIMAN, A. Effect of Machining Parameters on Hole Quality of Micro Drilling for Brass. **Canadian Center of Science and Education – Modern Applied Science**, v. 3, n. 5, p. 221-230, 2009.

REBRAC. **Instrumentos de medição**. Sorocaba, 2009. Disponível em: <<http://www.rebrac.com.br/downloads/RUGOSIDADE%20-par%C3%A2metros.pdf>>. Acesso em: 11 jun. 2011.

RUTHERFORD, K.L. et al..Laboratory characterisation of the wear behaviour of PVD-coated tool steels and correlation with cutting tool performance. **Journal Surface & Coatings Technology**, Australia, v. 80, n. 1-2, p. 176-80, mar., 1996.

SALA, C. *et al.* Cobalt exposure in 'hard metal' and diamonds grinding tools manufacturing and in grinding processes, **The Science of the Total Environment**, v. 150, p. 111-116, 1994.

SABIROV, I.*et al.* Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: new horizons in development. **Materials Science And Engineering: A**, v. 560, n.10, p. 1-24, Jan., 2013.

SCHROETER, R. B. **Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único reguláveis**. 1989. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de santa Catarina, Florianópolis, 1989.

SILLIMAN, J., D., **Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application**. 2.ed. Dearborn, Michigan; Society of Manufacturing Engineers. 1992. p. 216.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte**. 5. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001, 249 p.

STEPHENSON, D.A.; AGAPIOU, J.S. Calculation of main cutting edge forces and torque for drills with arbitrary point geometries. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 32, n. 4, p. 521-538, Aug., 1992.

TEDESCO, M. E. *et al.* Estudo sobre qualidade superficial e desvio dimensional do aço AISI 4140 submetido ao processo de torneamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: IPEN, 2006. p. 1-12.

TOTTEN, George E., MACKENZIE, D. Scott. **Handbook of aluminum**. New York: Marcel Dekker, 2003.

TSAO, C.C.. Grey-Taguchi method to optimize the milling parameters of aluminum alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 40, n. 1-2, p. 41-48, 2009.

VIJAYARAGHAVAN, A.; DORNFELD, D. Automated energy monitoring of machine tools. **CIRP Annals e Manufacturing Technology**, v. 59, n. 1, p. 2-24, 2010.

VALIEV, R.Z.; ALEXANDROV, I.V. Nanostructured materials from severe plastic deformation. **Elsevier Science Ltd**, v. 12, p. 3540, 1999.

VALIEV, R.Z.; ISLAMGALIEV, R.K.; ALEXANDROV, I.V. Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation. **Progress in Materials Science**, v. 45, p. 103-189, 2000.

VALIEV, R.Z. *et al.* A produção de materiais a granel ultrafine de grãos por deformação plástica severa, **JOM**, v. 58, n.4, p. 33-39, 2006.

XIAO X.; LEV, L.C.; LUKITSCH, M.J. Material transfer during machining of aluminum alloys with polycrystalline diamond cutting tools. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 17-19, Aug., p. 5760–5765, 2009.

ZEILMANN, R. P. et al.; VACARO, T. Integridade superficial resultante de diferentes processos de usinagem. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, v. 6, n. 2, p. 94-103, 2010.

ZHILYAEV; A.P.; LANGDON, T.G. Mostcited progress in material science articles: Progress in **Materials SCIENCE**, v. 53, n. 6, p. 893-979, Aug., 2008.

ZONG, W.J. *et al.* Contact accuracy and orientations affecting the lapped tool sharpness of diamond cutting tools by mechanical lapping **Diamond & Related Materials**, v. 15, n. 9, p. 1424-1433, Sep., 2006.

WALKER, J. R. **Machining fundamentals**. 8. ed. Tinley Park: Goo heart-Willcox, 2004.

WICK, C. *et al.* **Tool and manufacturing engineers handbook**: a reference book for manufacturing engineers, managers, and technicians. 4th ed. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1988.

WITKIN, D.B.; LAVERNIA, E.J. Progress in Materials. **Science**, v. 51, p.1-60, 2006.

## **ANEXOS**

**ANEXO A - Certificado de calibração da máquina ZEISS 0065 E 066**



**CARL ZEISS DO BRASIL LTDA**  
 Av. DAS NAÇÕES UNIDAS, 21711 - SANTO AMARO - SÃO PAULO - SP - CEP 04795-100  
 TEL.: (11) 5693-5500 - FAX: (11) 5547-9671 - SITE: www.zeiss.de/br

RELATÓRIO DE SERVIÇO  
**IMT - MIKRO  
 MED - NTS**

Nº B 308

**INFORMAÇÕES CARL ZEISS**

TEC: Luiz Domingos de Oliveira  
 MATRÍC: 519 DPTO: SMY  
 TIPO SERV: MGPC CC. DEB: 14610  
 EXEC. INTERNA  EXEC. EXTERNA   
 SOLIC: 1 - 1 - 1 No. CIAM: 1

**INFORMAÇÕES DO CLIENTE**

CLIENTE: Fiat Automóveis S.A  
 END: Av. do Contorno da Fiat Nº: 3455  
 CID: Betim UF: MG CONT: Sr. Geraldo Magela  
 DPTO: Sala de Inspecão Equip 3032 TEL: (31) 41235950  
 E-MAIL: geraldo.assuncao@fiat.com.br FAX: 3141235950

**INFORMAÇÕES DO EQUIPAMENTO**

EQUIP: Contora G2 HTG Nº/S: 315014  
 ACCESS: 1509065  
 PATRIUM: CG9  
 GAR: CG9  
 CONS: BD26  
 SOFT: Calypso  
 CAB: AD516354  
 INST: 1 - 1 - 1

P O N T O					
DIA / MÊS	VIAGEM INICIO	CHEGADA CLIENTE	PARTEIDA CLIENTE	VIAGEM TÉRMINO	HORAS TRAB.
30/11	08:00	08:00	17:30		
31/11		08:00	17:30		
01/11	08:00			17:30	
04/11	06:00	17:30	17:30		
05/11		08:00	17:30		
06/11		08:00	17:30		
/	:	:	:	:	:
/	:	:	:	:	:
/	:	:	:	:	:
/	:	:	:	:	:
/	:	:	:	:	:

MOTIVO DO ATENDIMENTO: MGPC com Dr. Calibração e Calibração RBC

DESCRIÇÃO DO SERVIÇO EXECUTADO

EFETUADA a Pré-Calibração RBC.  
EFETUADA a MGPC conforme working plan  
verifique e assinada pelo cliente.  
EFETUADA a Calibração RBC ISO-10360 e  
todos os valores estão dentro do especificado  
pele fabricante.  
Durante a Calibração a sala teve problemas  
de oscilação de temperatura, que afetaram  
as medições de CHM que poderiam ser  
melhores.

**IMT - ATENDIMENTO**  
 TELEPHONE 55 11 5693-55  
 FAX 55 11 5547-96  
 E-MAIL imtbrasil@zeiss

**MMS - ATENDIMENTO**  
 TELEPHONE 55 11 5693-55  
 FAX 55 11 5547-96  
 E-MAIL servicetr@zeiss

**CONTROLE E ASSINATURAS CARL ZEISS**

EMITENTE: Luiz Domingos GERENTE / SUPERVISOR  
 DATA: 06/11/2015

ASSINATURA: Magela 60880  
 Nome: Geraldo Magela Assuncao  
 Data: 07/11/15

**PEÇAS TROCADAS**

QUANT.	CÓDIGO	DESCRIÇÃO

**OBSERVAÇÕES CARL ZEISS E CLIENTE**

- A CHM está com um ruído no Div de CIX que pode ser problema de parada, precisamos afixar o Div 623035-000 e também precisa melhorar o problema de oscilação de temperatura que afetam diretamente nas calibrações.

ASSINATURADO CLIENTE

**DADOS DO FORNECEDOR:**

<b>Empresa:</b> CARL ZEISS DO BRASIL LTDA.	
<b>Endereço:</b> Av. das Nações Unidas, 21.711	
<b>Cidade:</b> São Paulo – SP	
<b>Depto.:</b> IMT Serviços	<b>Telefone:</b> 11 5693-5541

**DADOS DO EQUIPAMENTO:**

<b>Tipo MMC:</b>	<b>Contura G2 HTG</b>	<b>No. Série:</b> 501705
------------------	-----------------------	--------------------------

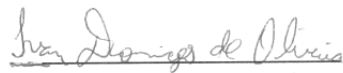
**DATA DA ENTREGA DA MMC APÓS TÉRMINO DA MANUTENÇÃO/CALIBRAÇÃO:****06/11/2013**

Prezado Cliente,

A calibração desta Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) é de responsabilidade da Carl Zeiss do Brasil, a qual foi realizada de acordo com a norma ISO 10360-2 / VDI-VDE 2617 e os resultados das medições estão dentro das tolerâncias fornecidas pelo fabricante.

O Certificado de Calibração será enviado posteriormente.

Atenciosamente,



Técnico – IMT Serviços



**CARL ZEISS DO BRASIL LIDA**  
 Av. DAS NAÇÕES UNIDAS, 21711 - SANTO AMARO - SÃO PAULO - SP - CEP 04795-100  
 TEL.: (11) 5693-5500 - FAX: (11) 5547-9671 - SITE: www.zeiss.de/br

**IMT - MIKRO  
 MED - NTS**

**Nº B 308:**

**INFORMAÇÕES CARL ZEISS**

TIC: Van Domingos de Oliveira  
 MATRÍC: 519 DPTO: IMT  
 TIPO SERV: HGPC C.C. DEB: 14610  
 EXEC. INTERNA  EXEC. EXTERNA   
 SOLIC: 1-1-1- No. CHAM: -

**INFORMAÇÕES DO CLIENTE**

CLIENTE: Fist Autoativos S.A  
 END: Av. do Conbarco da Fist Nº: 3455  
 CID: Brejo UF: CONT.  
 DPTO: Sala de inspeção equip 3031 TEL: 13112223-5150  
 E-MAIL: geral@assuvel.com.br FAX: -

**INFORMAÇÕES DO EQUIPAMENTO**

EQUIP: Contam G2 HR6 Nº/S: 45012  
 ACCESS: -  
 PATRIM: 07.150.0066  
 GAB: 099  
 CONS: R126  
 SOFT: Calypso  
 CAR: R09725123  
 INST: -

**PONTTO**

DIA / MÊS	VIAGEM INICIO	CHEGADA CLIENTE	PARTIDA CLIENTE	VIAGEM TÉRMINO	HORAS TRAB.
09/11	:	08:00	12:30	:	,
08/11	:	08:00	14:00	:	,
11/11	06:00	12:30	17:30	:	,
12/11	:	08:00	17:30	:	,
13/11	:	08:00	12:30	:	,
/	:	:	:	:	,
/	:	:	:	:	,
/	:	:	:	:	,
/	:	:	:	:	,
/	:	:	:	:	,
/	:	:	:	:	,

MOTIVO DO ATENDIMENTO: Calibração HGPC com Pré-Calibração e Calibração HBL.

DESCRIÇÃO DO SERVIÇO EXECUTADO

+ Efetuadas Pré-Calibração HBL  
- Efetuada a HGPC conforme working plan da fábrica assinada pelo cliente.  
- Efetuadas a Calibração HBL ISO-10360 e todos os valores estão dentro do especificado pelo fabricante.  
- Durante a calibração, não foi problema de oscilação de temperatura que afetaria as medições da CHM, que poderiam ser melhores.

**IMT - ATENDIMENTO**  
 TELEFONE: 55 11 5693-55  
 FAX: 55 11 5547-96  
 E-MAIL: imtbrasil@zeiss

**MMS - ATENDIMENTO**  
 TELEFONE: 55 11 5693-55  
 FAX: 55 11 5547-96  
 E-MAIL: servicebr@zeiss

**PEÇAS TROCADAS**

QUANT.	CÓDIGO	DESCRIÇÃO

**OBSERVAÇÕES CARL ZEISS E CLIENTE**

- A CHM está com um problema na RDS em duas posições a 180° e está do lado A e não estão indicadas, iremos nos trocar o RDS p/20610-900-000 para que trabalhe 200°.

**CONTROLE E ASSINATURAS CARL ZEISS**

EMITENTE: Van Domingos GERENTE / SUPERVISOR: \_\_\_\_\_ COMERCIAL: \_\_\_\_\_  
 14/11/2013

**ASSINATURADO CLIENTE**

Assinatura: [Signature]  
 Nome: Polvo André Costa  
 Data: 14/11/2013

99013138

**DADOS DO FORNECEDOR:**

<b>Empresa:</b> CARL ZEISS DO BRASIL LTDA.	
<b>Endereço:</b> Av. das Nações Unidas, 21.711	
<b>Cidade:</b> São Paulo – SP	
<b>Depto.:</b> IMT Serviços	<b>Telefone:</b> 11 5693-5541

**DADOS DO EQUIPAMENTO:**

<b>Tipo MMC:</b>	<b>Contura G2 HTG</b>	<b>No. Série:</b> 501709
------------------	-----------------------	--------------------------

**DATA DA ENTREGA DA MMC APÓS TÉRMINO DA MANUTENÇÃO/CALIBRAÇÃO:****13/11/2013**

Prezado Cliente,

A calibração desta Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) é de responsabilidade da Carl Zeiss do Brasil, a qual foi realizada de acordo com a norma ISO 10360-2 / VDI-VDE 2617 e os resultados das medições estão dentro das tolerâncias fornecidas pelo fabricante.

O Certificado de Calibração será enviado posteriormente.

Atenciosamente,



Técnico – IMT Serviços

**ANEXO B - Certificado de calibração da máquina ZEISS 148**

<b>RELATÓRIO DE SERVIÇO</b> <b>IMT - MIKRO</b> <b>MED - NTS</b> <b>N° B 30831</b>																																																																			
<b>CARL ZEISS DO BRASIL LTDA.</b> Av. DAS NAÇÕES UNIDAS, 21711 - SANTO AMARO - SÃO PAULO - SP - CEP 04795-100 TEL.: (11) 5693-5500 - FAX: (11) 5547-9671 - SITE: www.zeiss.de/br																																																																			
<b>INFORMAÇÕES DO CLIENTE</b>																																																																			
CLIENTE: <b>Fiat Automóveis S.A</b> END.: <b>Av. do Centenário da Fiat</b> Nº 3455 CID.: <b>Betim</b> UF: <b>MG</b> CONT.: <b>Sr. Pedro Claudio</b> DPTO.: <b>Gala de Inspeção eq. 303</b> TEL: <b>312123-5150</b> E-MAIL: <b>Pedro.costa@fiat.com.br</b> FAX:																																																																			
<b>INFORMAÇÕES DO EQUIPAMENTO</b>																																																																			
EQUIP.: <b>Contra G2 HTG</b> Nº/S: <b>#501713</b> ACCESS: <b>-</b> PATRIM.: <b>2007.150.0148</b> SOFT.: <b>Calypro</b> CAB.: <b>RDS/vestdxt</b> CONS.: <b>B226</b> INST.: <b>-</b>																																																																			
<b>MOTIVO DO ATENDIMENTO:</b> <b>Calibração RBC</b>																																																																			
<b>DESCRIÇÃO DO SERVIÇO EXECUTADO</b>																																																																			
- Efetuado a Pré-Calibração RBC. - Efetuado a MgPC conforme working plan entregue assinado pelo cliente. - Efetuado a Calibração RBC ISO-10360 e todos os valores encontrados estão dentro do especificado pelo fabricante.																																																																			
<b>P O N T O</b>																																																																			
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>MÊS</th> <th>VIAGEM INÍCIO</th> <th>CHEGADA CLIENTE</th> <th>PARTIDA CLIENTE</th> <th>VIAGEM TERMINO</th> <th>HÓRAS TRAB.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>11</td> <td>:</td> <td>08:00</td> <td>14:00</td> <td>19:00</td> <td>,</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>10:00</td> <td>15:30</td> <td>17:30</td> <td>:</td> <td>,</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>:</td> <td>08:00</td> <td>19:30</td> <td>:</td> <td>,</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>:</td> <td>08:00</td> <td>20:30</td> <td>:</td> <td>,</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>:</td> <td>08:00</td> <td>13:00</td> <td>:</td> <td>,</td> </tr> <tr> <td>/</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>,</td> </tr> <tr> <td>/</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>,</td> </tr> <tr> <td>/</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>,</td> </tr> <tr> <td>/</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>,</td> </tr> <tr> <td>/</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>:</td> <td>,</td> </tr> </tbody> </table>	MÊS	VIAGEM INÍCIO	CHEGADA CLIENTE	PARTIDA CLIENTE	VIAGEM TERMINO	HÓRAS TRAB.	11	:	08:00	14:00	19:00	,	11	10:00	15:30	17:30	:	,	11	:	08:00	19:30	:	,	11	:	08:00	20:30	:	,	11	:	08:00	13:00	:	,	/	:	:	:	:	,	/	:	:	:	:	,	/	:	:	:	:	,	/	:	:	:	:	,	/	:	:	:	:	,	OBSERVAÇÕES CARL ZEISS E CLIENTE  PEÇAS TROCADAS  DESCRIÇÃO
MÊS	VIAGEM INÍCIO	CHEGADA CLIENTE	PARTIDA CLIENTE	VIAGEM TERMINO	HÓRAS TRAB.																																																														
11	:	08:00	14:00	19:00	,																																																														
11	10:00	15:30	17:30	:	,																																																														
11	:	08:00	19:30	:	,																																																														
11	:	08:00	20:30	:	,																																																														
11	:	08:00	13:00	:	,																																																														
/	:	:	:	:	,																																																														
/	:	:	:	:	,																																																														
/	:	:	:	:	,																																																														
/	:	:	:	:	,																																																														
/	:	:	:	:	,																																																														
<b>CONTROLE E ASSINATURAS CARL ZEISS</b>																																																																			
EMITENTE: <b>van Diniz</b> GERENTE / SUPERVISOR ASSINATURA DO CLIENTE: <b>Pedro Claudio Costa</b>																																																																			



IMT - ATENDIMENTO  
 TELEFONE 55 11 5693-5541  
 FAX 55 11 5547-9671  
 E-MAIL imbrasil@zeiss.org  
  
 MMS - ATENDIMENTO  
 TELEFONE 55 11 5693-5533  
 FAX 55 11 5547-9671  
 E-MAIL servicebr@zeiss.org

**DADOS DO FORNECEDOR:**

<b>Empresa:</b> CARL ZEISS DO BRASIL LTDA.	
<b>Endereço:</b> Av. das Nações Unidas, 21.711	
<b>Cidade:</b> São Paulo – SP	
<b>Depto.:</b> IMT Serviços	<b>Telefone:</b> 11 5693-5541

**DADOS DO EQUIPAMENTO:**

<b>Tipo MMC:</b>	<b>Contura G2 HTG</b>	<b>No. Série:</b> 501713
------------------	-----------------------	--------------------------

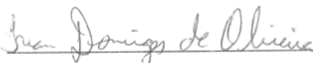
**DATA DA ENTREGA DA MMC APÓS TÉRMINO DA MANUTENÇÃO/CALIBRAÇÃO:****21/11/2013**

Prezado Cliente,

A calibração desta Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) é de responsabilidade da Carl Zeiss do Brasil, a qual foi realizada de acordo com a norma ISO 10360-2 / VDI-VDE 2617 e os resultados das medições estão dentro das tolerâncias fornecidas pelo fabricante.

O Certificado de Calibração será enviado posteriormente.

Atenciosamente,

  
Técnico – IMT Serviços