

**Universidade de Brasília - UnB**  
**Faculdade UnB Gama - FGA**  
**Engenharia Automotiva**

**ESTUDO DO TUBO VÓRTICES NO TORNEAMENTO**

**Autores: Davi Pires Araujo**  
**Denis Barbosa Sousa**  
**Orientador: Rhander Viana**  
**Co-orientador: Jhon N. V. Goulart**

**Brasília, DF**  
**2017**



**DAVI PIRES ARAUJO  
DENIS BARBOSA SOUSA**

**TÍTULO: ESTUDO DO TUBO VÓRTICES NO TORNEAMENTO**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Prof. Dr. Rhander Viana

Co-Orientador: Prof. Dr. Jhon N. V. Goulart

**Brasília, DF  
2017**

**CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Araujo, Davi Pires; Sousa, Denis Barbosa

Título da Monografia: Estudo do tubo vórtices no torneamento  
/ Davi Pires Araujo; Denis Barbosa Sousa. Brasília: UnB,  
2017. 103 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2017. Orientação: Rhander Viana

1. Tubo vórtices. 2. Fluido de corte. 3. Faceamento rápido. 4. Torno.  
5. Usinagem. I. Viana, Rhander. II. Estudo do tubo vórtices no  
torneamento.

CDU Classificação



## **ESTUDO DO TUBO VÓRTICES NO TORNEAMENTO**

**Davi Pires Araujo**  
**Denis Barbosa Sousa**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 14/06/2017 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. Rhander Viana, UnB/ FGA**

Orientador

---

**Prof. Jhon N. V. Goulart, UnB/ FGA**

Co-Orientador

---

**Me. Danilo dos Santos Oliveira, UnB/FGA**

Membro Convidado

---

**Prof. Tiago de Melo**

Membro Convidado

Brasília, DF

2017

## RESUMO

Neste trabalho será apresentado o funcionamento e aplicação do tubo vórtices. Este tubo possui uma entrada, a qual é injetada ar comprimido, e duas saídas, uma com fluxo de ar quente e outra de ar frio. O tubo vórtices é um dispositivo mecânico utilizado na conversão de energia cinética do ar em energia térmica. O objetivo principal deste trabalho é aplicar o fluxo de ar frio do tubo vórtices em um processo de usinagem, especificamente, o torneamento, comparando seu desempenho com a condição a seco e jorro. Para essa comparação foram realizados ensaios de vida de ferramenta de aço-rápido M2 com 10 % de cobalto no faceamento rápido do aço SAE 1045 e medição da temperatura de usinagem, da ferramenta de corte, com câmera termográfica no torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045 com insertos de metal duro da classe P e do Ferro Fundido Cinzento FC250 com insertos de metal duro da classe K. A melhor eficiência térmica do dispositivo deu-se quando submetido a pressão de 8 bar, atingindo assim  $-7,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . No ensaio de faceamento rápido o tubo vórtices foi mais eficiente do que a aplicação de fluido de corte em jorro, aumentando a vida da ferramenta em 0,44 %, nas condições de corte propostas. Nos ensaios de medição da temperatura com câmera termográfica, o fluido de corte em jorro teve maior eficiência na diminuição da temperatura na superfície de saída da ferramenta em relação ao tubo vórtices, tendo uma diminuição de 0,002 %, para as condições de corte utilizadas para o Aço SAE 1045. A avaliação dos custos ainda é um fator que estimula a utilização do fluido de corte na usinagem.

**Palavras-chave:** Tubo Vórtices, Jorro, Faceamento Rápido, Torneamento, Aço SAE 1045, Ferro Fundido Cinzento FC250.

## ABSTRACT

In this work will be presented the operation and application of the vortex tube. This tube has an inlet, which is injected compressed air, and two outlets, one with hot air flow and the other with cold air. The vortex tube is a mechanical device used in the conversion of kinetic energy from air to thermal energy. The main objective of this work is to apply the cold air flow from the vortex tube in a machining process, specifically in the turning, comparing its performance with dry and cutting fluid condition. For this comparison, tool life trials of M2 high speed steel with 10% cobalt in the fast face turning of SAE 1045 steel and machining temperature measurement, cutting tool with thermographic camera in SAE 1045 steel cylindrical external turning. With class P carbide tooling and FC250 Gray Cast Iron with K-grade carbide tooling. The best thermal efficiency of the device occurred when subjected to a pressure of 8 bar, thus reaching  $-7.8^{\circ}\text{C}$ . In the fast face turning test, the vortex tube is more efficient than the application of the abundance cutting fluid, raising the tools life in 0.44% in the proposed cutting conditions. In the temperature measurement tests with thermographic camera, the abundance cutting fluid had the greatest efficiency in decreasing the temperature at the tool outlet surface relative to the vortex tube, having a decrease of 0,002%, for the cutting conditions used for SAE 1045 steel. Cost analysis is still a factor that encourages the use of cutting fluid in machining.

**Keywords:** Vortex Tube, Cutting Fluid, Fast Face Turning, Turning, SAE 1045 Steel, FC250 Gray Cast Iron.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ferramenta de corte fixa e peça em rotação (Fonte: Adaptado de Machado <i>et al.</i> , 2015). .....	17
Figura 2. Tipos de torneamento (Fonte: Machado <i>et al.</i> , 2015)......	18
Figura 3. Forças de usinagem (Fonte: Adaptado de Machado <i>et al.</i> , 2015). ....	19
Figura 4. Regiões ferramenta-material (Fonte: Adaptado de Shaw, 2005). ....	19
Figura 5. Parâmetros fundamentais no processo de torneamento (Fonte: Adaptado de Kennametal, 2014)......	20
Figura 6. Consequência do alto e baixo avanço (Fonte: Miranda, 2010)......	21
Figura 7. Detalhamento do processo de faceamento rápido (Fonte: Reis, 2015). ....	22
Figura 8. Elementos de uma cunha de corte de uma ferramenta qualquer (Machado <i>et al.</i> 2015).24	
Figura 9. Representação esquemática do plano de referência da ferramenta (Pr), (Fonte: Reis, 2000). ....	25
Figura 10. Representação esquemática do plano de corte da ferramenta (Ps) (Fonte: Reis, 2000). .....	25
Figura 11. Representação esquemática do plano ortogonal da ferramenta (Po) (Fonte: Reis, 2000). .....	26
Figura 12. Ângulos da cunha cortante medido no plano ortogonal (Fonte: Reis, 2000)......	26
Figura 13. Ângulos de posição medidos no plano de referência (Fonte: Reis, 2000). ....	27
Figura 14. Funcionamento do tubo vórtices unifluxo (Fonte: Adaptado de Gao, 2005). ....	29
Figura 15. Funcionamento do tubo vórtices contrafluxo (Fonte: Adaptado de Gao, 2005). ....	30
Figura 16. Componentes do tubo vórtices (Fonte: Autores, 2016). ....	30
Figura 17. Dimensões do tubo vórtices (Fonte: Autores, 2016)......	31
Figura 18. Dimensões do tubo - Diâmetro do bocal de entrada de ar comprimido (Fonte: Autores, 2016). ....	31
Figura 19. Relação d/D e variação de temperatura (Fonte: Adaptado de Saidi e Valipour, 2003). 32	
Figura 20. Geometria do bocal de entrada (Fonte: Saidi e Valipour, 2003). ....	33
Figura 21. Quantidade de sulcos e variação de temperatura (Fonte: Adaptado de Saidi e Valipour, 2003). ....	33
Figura 22. Geometria da válvula de ar quente (Fonte: Adaptado de Gao, 2005)......	34
Figura 23. Configuração de usinagem utilizando tubo vórtices (Fonte: Adaptado de Liu e Chou, 2007). ....	35
Figura 24. Tubo vórtices no processo de torneamento (Fonte: Nex-flow, 2016)......	35
Figura 25. Configuração experimental - Câmera Termográfica (Fonte: Adaptado de Selek et al 2011). ....	36
Figura 26. Fluxograma da metodologia de trabalho proposta (Fonte: Autores, 2016). ....	42
Figura 27. Montagem do experimento de faceamento rápido (Fonte: Autores, 2017). ....	43
Figura 28. Faceamento rápido a seco (Fonte: Autores, 2017)......	44
Figura 29. Porcentagem de fluido de corte na escala Brix (Fonte: Autores, 2017). ....	45
Figura 30. Faceamento rápido com jorro de fluido de corte (Fonte: Autores, 2017). ....	45

Figura 31. Faceamento rápido com utilização do Tubo Vórtices (Fonte: Autores, 2017).....	46
Figura 32. Montagem do relógio comparador para medição do ressalto formado (Fonte: Autores, 2017). .....	47
Figura 33. Posicionamento da Câmera Térmica no torno (Fonte: Autores, 2017). .....	48
Figura 34. Retirada da amostra do tarugo do aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017).....	48
Figura 35. Geometria da ferramenta de corte (Fonte: Sandvik, 2012).....	49
Figura 36. Torneamento cilíndrico externo a seco do aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017).....	50
Figura 37. Torneamento cilíndrico externo com jorro aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017). .....	51
Figura 38. Torneamento cilíndrico externo com tubo vórtices aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017). .....	51
Figura 39. Vista frontal e lateral dos bits afiados (Fonte: Autores, 2017).....	52
Figura 40. Ferramentas afiadas pela empresa AFIA TEC (Fonte: Autores, 2017).....	52
Figura 41. Corte da amostra do tarugo de ferro fundido para ensaio (Fonte: Autores, 2017). .....	54
Figura 42. Preparação do corpo de prova de ferro fundido (Fonte: Autores, 2017).....	55
Figura 43. Torneamento cilíndrico externo a seco ferro fundido (Fonte: Autores, 2017).....	56
Figura 44. Torneamento cilíndrico externo com fluido ferro fundido (Fonte: Autores, 2017).....	56
Figura 45. Torneamento cilíndrico externo com tubo vórtices ferro fundido (Fonte: Autores, 2017). .....	57
Figura 46. Corpo de prova para ensaio de metalografia (Fonte: Autores, 2017). .....	58
Figura 47. Procedimento de lixamento superficial da peça (Fonte: Autores, 2017). .....	59
Figura 48. Evolução da superfície do material após o lixamento com lixas de <i>mesh</i> 100, 240 e 320 (Fonte: Autores, 2017). .....	60
Figura 49. Evolução da superfície do material após o lixamento com lixas de <i>mesh</i> 400, 600, 800 e 1200 (Fonte: Autores, 2017). .....	60
Figura 50. Superfície da amostra após polimento (Fonte: Autores, 2017).....	61
Figura 51. Microestrutura da amostra de ferro fundido cinzento FC250, ampliação de x50 e nital a 2% (Fonte: Autores, 2017). .....	61
Figura 52. Corpo de prova para ensaio de metalografia do aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017). .....	63
Figura 53. Procedimento de lixamento superficial da peça (Fonte: Autores, 2017). .....	64
Figura 54. Evolução da superfície do material após o lixamento com lixas de <i>mesh</i> 100, 240 e 320 (Fonte: Autores, 2017). .....	64
Figura 55. Evolução da superfície do material após o lixamento com lixas de <i>mesh</i> 400, 600 e 1200 (Fonte: Autores, 2017). .....	65
Figura 56. Superfície da amostra após polimento (Fonte: Autores, 2017).....	65
Figura 57. Microestrutura da amostra de Aço SAE 1045, ampliação de x50 e nital a 2% (Fonte: Autores, 2017). .....	66
Figura 58. Relação entre temperatura e pressão (Fonte: Autores, 2017).....	69
Figura 59. Gradiente de temperatura na saída de ar quente (Fonte: Autores, 2017).....	69
Figura 60. Gradiente de temperatura na saída de ar frio (Fonte: Autores, 2017). .....	70
Figura 61. Gradiente de temperatura da vista frontal da saída de ar frio (Fonte: Autores, 2017)...	70



Figura 62. Resultados do faceamento rápido em diferentes condições de refrigeração (Fonte: Autores, 2017). .....	71
Figura 63. Medições de temperaturas na ponta da ferramenta no torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017).....	72
Figura 64. Gráfico temperatura x velocidade de corte para diferentes condições de refrigeração (Fonte: Autores, 2017). .....	73
Figura 65. Comparação do diâmetro de colapso da ferramenta no torneamento por faceamento rápido em condições diferentes de refrigeração (Fonte: Autores, 2017). .....	73
Figura 66. Resultados do torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045 em diferentes condições de refrigeração (Fonte: Autores, 2017).....	75
Figura 67. Medições de temperaturas na ponta da ferramenta no torneamento cilíndrico externo do ferro fundido (Fonte: Autores, 2017). .....	76
Figura 68. Temperaturas de corte para condições diferentes de refrigeração e velocidades de corte variadas (Fonte: Autores, 2017). .....	77
Figura 69. Gráfico de custo por quantidade de horas usinada sem analisar os custos iniciais (Fonte: Autores, 2017). .....	78
Figura 70. Gráfico de custo por quantidade de horas usinada analisando os custos iniciais (Fonte: Autores, 2017). .....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Pontos críticos devido a baixas e elevadas velocidades (Fonte: Adaptado de Almeida, 2007). .....	21
Tabela 2. Critérios de fim da vida da ferramenta regulamento pela ISO 3685:1993.....	22
Tabela 3. Propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento, vermicular e nodular (Fonte: Adaptado de Norma SAE J 1887:2002). .....	37
Tabela 4. Propriedades mecânicas do aço SAE 1045 (Fonte: Adaptado de Metals Handbook,1991). .....	38
Tabela 5. Condições de corte e geometria da ferramenta no faceamento rápido do Aço ABNT 1045 (Fonte: Autores, 2017). .....	44
Tabela 6. Condições de corte utilizadas nos ensaios de medição de temperatura (Fonte: Autores, 2017). .....	49
Tabela 7. Dimensões da ferramenta de corte (Fonte: Sandvik, 2012).....	50
Tabela 8. Condições de corte e geometria da ferramenta no faceamento rápido do Aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017). .....	53
Tabela 9. Condições de corte utilizadas nos ensaios de medição de temperatura (Fonte: Autores, 2017). .....	53
Tabela 10. Condições de corte utilizadas nos ensaios de medição de temperatura no torneamento cilíndrico externo do ferro fundido cinzento FC250 (Fonte: Autores, 2017). .....	55
Tabela 11. Parâmetros para análise de custos (Fonte: Autores, 2017).....	67
Tabela 12. Relação entre temperaturas, pressão e abertura de válvula (Fonte: Autores, 2017). ..	68
Tabela 13. Temperaturas para diferentes condições de refrigeração e velocidades de corte (Fonte: Autores, 2017). .....	72
Tabela 14. Temperaturas para diferentes condições de refrigeração e velocidades de corte (Fonte: Autores, 2017). .....	75
Tabela 15. Temperaturas para diferentes condições de refrigeração e velocidades de corte (Fonte: Autores, 2017). .....	76

## LISTA DE SIMBOLOS

### Letras Latinas

$a_p$	Profundidade de Corte
$A_y$	Superfície de Saída
$A_\alpha$	Superfície de Folga Principal
$A_{\alpha'}$	Superfície de Folga Secundaria
$D$	Diâmetro da Peça a ser Usinada
$d$	Diâmetro de Saída de Ar Frio
$d_e$	Diâmetro do Bocal de Entrada de Ar Comprimido
$D_T$	Diâmetro do Tubo
$E_r$	Ângulo de Ponta
$f$	Avanço
$F$	Força de Usinagem
$F_a$	Força de Avanço
$F_c$	Força de Corte
$F_p$	Força Passiva
$IC$	Diâmetro do Círculo Inscrito
$L$	Comprimento do Tudo de Ar Quente
$LE$	Espessura da Ferramenta
$n$	Número de Rotações por Minuto (rpm)
$P_f$	Plano Admitido de Trabalho
$P_o$	Plano Ortogonal da Ferramenta
$P_r$	Plano de Referência da Ferramenta
$P_s$	Plano de Corte da Ferramenta
$RE$	Raio de Canto
$S$	Aresta de Corte
$s$	Plano de Corte da Ferramenta
$T$	Vida da ferramenta
$T_i$	Temperatura Inicial da Ferramenta
$TFA$	Temperatura na Saída de Ar Frio com a Válvula Aberta
$TFF$	Temperatura na Saída de Ar Frio com a Válvula Fechada
$TQA$	Temperatura na Saída de Ar Quente com a Válvula Aberta
$TQF$	Temperatura na Saída de Ar Quente com a Válvula Fechada
$V_c$	Velocidade de Corte
$X_f$	Ângulo de Posição Secundário da Ferramenta

$\gamma_0$ .....Ângulo de Saída da Ferramenta

Letras Gregas

$\alpha_0$ .....Ângulo de Folga da Ferramenta

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1. OBJETIVOS.....	16
1.1.1. Objetivo geral.....	16
1.1.2. Objetivos Específicos.....	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
2.1. CONCEITOS DE USINAGEM.....	17
2.1.1. Fundamentos do processo de torneamento.....	17
2.1.2. Grandezas de corte no processo de torneamento.....	20
2.2. PROCESSO DE FACEAMENTO RÁPIDO.....	21
2.3. FERRAMENTAS DE CORTE.....	23
2.3.1. Geometria das Ferramentas.....	23
2.3.1.1. Planos da Ferramenta.....	24
2.3.1.2. Ângulos Principais.....	26
2.4. TIPOS DE REFRIGERAÇÃO.....	27
2.4.1. Fluido de corte.....	28
2.4.1.1. Sistema Lubri-Refrigerante.....	28
2.4.2. Tubo Vórtices.....	28
2.4.2.1. Funcionamento.....	29
2.4.2.2. Geometria.....	30
2.4.2.3. Usinagem com ar comprimido a frio - Tubo Vórtices.....	34
2.5. FERRO FUNDIDO.....	36
2.5.1. Propriedades Mecânicas.....	37
2.6. AÇO SAE 1045.....	37
2.6.1. Propriedades mecânicas do aço SAE 1045.....	38
<b>3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>39</b>
3.1. MATERIAIS.....	39
3.1.1. Medição da eficiência térmica do dispositivo.....	39
3.1.2. Medição de temperatura no torneamento cilíndrico externo e ensaios de vida no faceamento rápido nos pré-testes e definitivos.....	39
3.1.3. Ensaio metalográfico.....	40
3.2. METODOLOGIA.....	41
3.2.1. Medição de Temperatura no Tubo Vórtices.....	42
3.2.2. Pré-testes.....	43
3.2.2.1. Faceamento rápido no torneamento do aço SAE 1045.....	43
3.2.2.2. Caracterização do Diâmetro Usinado.....	46
3.2.2.3. Medição de temperatura com câmera termográfica no torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045.....	47
3.2.3. Faceamento rápido no torneamento do aço SAE 1045 - Ensaio Definitivo.....	52
3.2.4. Medição de temperatura com câmera termográfica no torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045 - Ensaio Definitivo.....	53
3.2.5. Medição de temperatura com câmera termográfica no torneamento cilíndrico externo do Ferro Fundido Cinzento FC250 - Ensaio Definitivo.....	54
3.2.6. Caracterização do Ferro Fundido Cinzento FC250.....	57
3.2.6.1. Ensaio Metalográfico do Ferro Fundido Cinzento FC250.....	57
3.2.7. Caracterização do Aço SAE 1045.....	62
3.2.7.1. Ensaio Metalográfico do Aço SAE 1045.....	62
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>68</b>
4.1. MEDIÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO DISPOSITIVO.....	68
4.2. PRÉ-TESTES.....	70
4.2.1. Faceamento rápido no torneamento do aço SAE 1045.....	70
4.2.2. Medição de temperatura com câmera termográfica no torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045.....	71

4.3. FACEAMENTO RÁPIDO - MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DE COLAPSO - ENSAIO DEFINITIVO.....	73
4.4. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO DO AÇO SAE 1045 - ENSAIO DEFINITIVO .....	74
4.5. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO FC250 - ENSAIO DEFINITIVO.....	76
4.6. ANÁLISE DE CUSTOS .....	77
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>80</b>
<b>6. TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>81</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>82</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>86</b>
APÊNDICE A - MEDIDAS DO TUBO VÓRTICES UTILIZADO.....	86
APÊNDICE B - ARTIGO PUBLICADO NOS ANAIS DO ENCONTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (ECT) – UNB GAMA 2016 .....	87
APÊNDICE C – ARTIGO CIENTÍFICO ACEITO NO IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO (COBEF).....	91

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem atualmente são bem difundidos, estando presentes nas etapas de fabricação da maioria dos produtos industrializados. De acordo com Trent (1984), o processo de fabricação mais popular no mundo é o de remoção de material com produção de cavaco. Neste há mais adeptos pela capacidade de fabricar peças com grau de tolerância desejado, baixo custo e alta produtividade.

Os processos mais comuns utilizados pela indústria são: furação, fresamento, torneamento, rosqueamento, brunimento, brochamento e mandrilamento. Em todos eles há a necessidade de utilizar fluídos de corte com o intuito de resfriar e/ou lubrificar a ferramenta de usinagem, com o objetivo de aumentar a vida útil da ferramenta e melhorar a qualidade superficial da peça.

Segundo Diniz *et al* (2013), a utilização do fluido de corte em alguns processos de usinagem já pode ser evitado ou minimizado, com o objetivo de diminuir a poluição do meio ambiente, o custo de produção, o tratamento posterior do fluido de corte e essencialmente diminuir os danos causados a saúde do operador da máquina-ferramenta. Segundo Miranda (2003), baseando-se em uma pesquisa realizada no século XX na indústria norte-americana, trabalhadores que estavam expostos ao fluido de corte possuíam 50% de chance a mais de adquirir câncer quando comparado aos trabalhadores que não estavam em contato.

Além do risco de câncer, os fluidos de corte em geral não possuem descarte adequado. Podendo poluir o solo, ar e água. O fluido de corte representa 16 % do custo final de fabricação da peça. Nesta porcentagem estão incluídas aquisição, preparo, descarte e armazenamento. Em virtude desses fatores, que desabonam o uso do fluido de corte, existe constantemente uma busca por métodos de refrigeração/lubrificação da ferramenta de corte na usinagem (Machado *et. al*; 2015).

Mediante os pontos inferidos anteriormente, neste trabalho buscou-se um método para refrigeração da ferramenta de corte, o qual seria de baixo custo e minimizaria os riscos de poluição do meio ambiente e riscos a saúde do operador. A utilização do ar comprimido para tal função mostrou-se como uma boa alternativa. Nesta não há a preocupação com todos os trâmites do fluido de corte e também em relação à saúde do operador.

Este trabalho tem por objetivo o estudo e aplicação de ar comprimido resfriado mediante a utilização do tubo vórtices na usinagem, especificamente, no torneamento. O intuito é investigar um sistema refrigerante com aplicação mais sustentável para a usinagem e menos agressivo ao meio ambiente e ao operador da máquina, quando comparado aos sistemas usuais.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho trata da realização do estudo do tubo vórtices na usinagem.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

Análise do tubo vórtices no torneamento com o intuito de aumentar a vida útil e diminuir a temperatura de usinagem na superfície de saída em ferramentas de aço-rápido da classe M2 com 10 % de cobalto e metal duro das classes P e K, respectivamente. Comparando o tubo vórtices com a usinagem a seco e uma condição lubri-refrigerante, jorro.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CONCEITOS DE USINAGEM

Usinagem pode ser entendida pelo processo de remoção de material com o intuito de obter uma peça final. Há vários processos de usinagem, estes são classificados pelo modo que removem o material, tem-se o processo por abrasão (retificação, dentre outros), não-convencionais (eletroerosão, eletroquímica, laser, dentre outros) e os convencionais (furação, fresamento, torneamento, e outros mais).

O processo que será analisado neste trabalho será o torneamento.

#### 2.1.1. Fundamentos do processo de torneamento

Neste processo a ferramenta de corte se desloca de forma retilínea ou curvilínea e a peça a ser usinada possui rotação em torno do eixo da máquina, a Fig. (1) mostra o torneamento retilíneo, que será o foco do trabalho. Nessa situação o cavaco é gerado através da deformação e remoção do material da peça. Devido a este fato, elevados valores de temperatura durante a usinagem são gerados, e estes são transferidos para o meio ambiente, cavaco, peça e também para a ferramenta de corte (Shaw, 2005).



Figura 1. Ferramenta de corte fixa e peça em rotação (Fonte: Adaptado de Machado *et. al.*, 2015).

Segundo a literatura existem 8 tipos de torneamento, estes são mostrados na Fig. (2). Para se definir qual o processo de torneamento, deverá ser analisado a geometria e o que se pretende realizar na peça.

O torneamento externo longitudinal é caracterizado pela ferramenta que se desloca retilineamente em relação a peça, temos 4 tipos, são eles: cilíndrico, cônico, radial e perfilamento.

No torneamento cilíndrico a ferramenta se desloca paralelamente ao eixo principal de rotação da máquina, este pode ser externo ou interno. O que difere deste para o cônico é a inclinação da ferramenta em relação ao eixo principal de rotação, também pode ser interno ou externo. Já o radial a ferramenta se desloca perpendicularmente ao eixo principal de rotação, quando o objetivo é uma superfície plana, o nome dado ao processo é faceamento. Se o objetivo for um entalhe circular, chama-se sangramento. Para o perfilamento a ferramenta pode se deslocar na direção radial ou axial, cujo objetivo é uma forma definida.

O recartilhamento é o processo com intuito de gerar uma deformação plástica na peça criando uma superfície com uma textura ordenada, o movimento da ferramenta é semelhante ao do perfilamento.

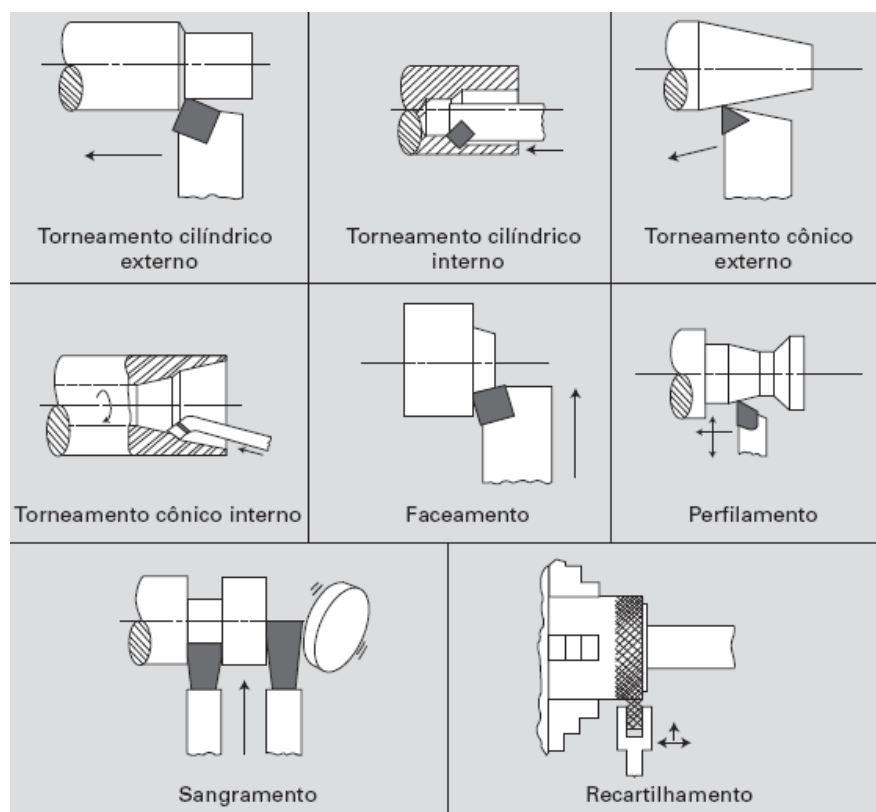


Figura 2. Tipos de torneamento (Fonte: Machado *et al*, 2015).

Em qualquer processo de torneamento há a geração de esforços de usinagem, que servem principalmente, para determinar a potência necessária requerida para o corte do material. No torneamento a força de usinagem é resultante de demais forças que agem sobre a peça. Na Figura (3) pode-se observar a força de usinagem ( $F$ ) sendo decomposta. A força de avanço ( $F_a$ ) é a força que contribui para a potência de usinagem na direção do avanço, já a força de corte ( $F_c$ ) também gera potência de usinagem na direção de corte. A força passiva ( $F_p$ ) não gera potência de usinagem, agindo perpendicularmente ao plano de trabalho, esta informa a direção de penetração da ferramenta de corte (Machado *et al*; 2015).

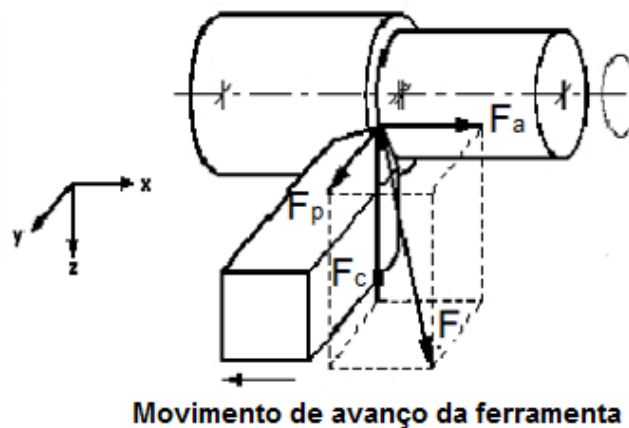


Figura 3. Forças de usinagem (Fonte: Adaptado de Machado *et al*, 2015).

A geração dos esforços de usinagem implica necessariamente no desenvolvimento de temperaturas elevadas de corte, e principalmente, em tensões elevadas em áreas restritas na interface cavaco-ferramenta. De acordo com Shaw (2005), há três áreas que podem ser observadas na região ferramenta-material usinado. A Figura (4) identifica essas áreas.

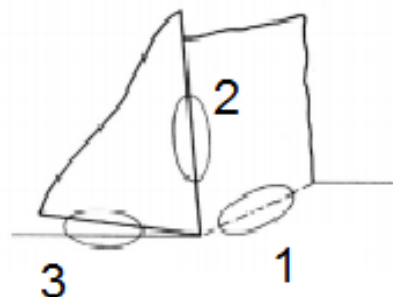


Figura 4. Regiões ferramenta-material (Fonte: Adaptado de Shaw, 2005).

A região 1 se estende ao plano de cisalhamento, esta influência na forma do cavaco e também forma a fronteira entre a região deformada e não deformada da peça. Nesta região o foco está na deformação plástica da peça (Sanches, 2011).

Já a região 2 está entre o cavaco e face da ferramenta, nesta há o atrito e o desgaste da ferramenta de corte. A rugosidade da peça final se dá através da região 3, localizada entre a superfície usinada e a ferramenta de corte (Sanches, 2011).

As regiões 1, 2 e 3 podem ser influenciadas, principalmente, pelas grandezas de corte que determinam o comportamento do material durante a usinagem, especificamente seu acabamento superficial, e desgaste da ferramenta de corte.

### 2.1.2. Grandezas de corte no processo de torneamento

Tem-se três parâmetros fundamentais no processo de torneamento, a velocidade de corte ( $v_c$ ), o avanço ( $f$ ) e a profundidade de corte ( $a_p$ ). Na Figura (5) esses parâmetros são identificados.

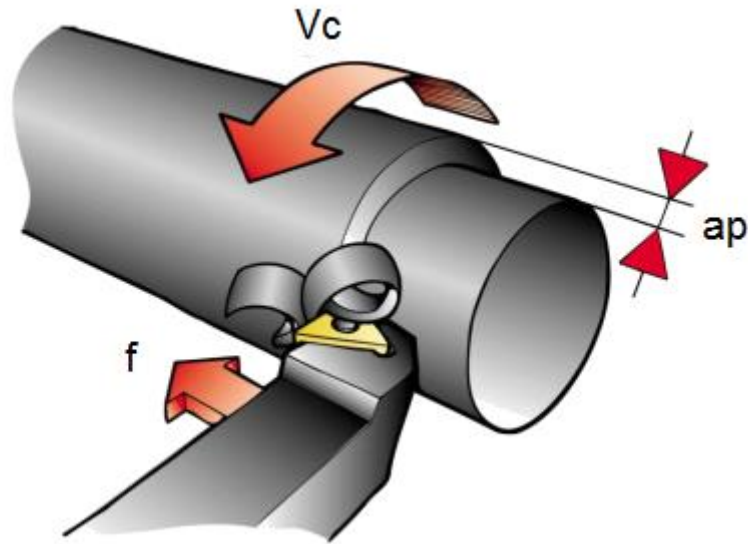


Figura 5. Parâmetros fundamentais no processo de torneamento (Fonte: Adaptado de Kennametal, 2014).

A velocidade de corte pode ser compreendida como sendo a velocidade com que a região a ser usinada cruza com o ponto de corte da ferramenta, ela é calculada através da Eq. (1).

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (1)$$

Onde,  $V_c$  é a velocidade de corte (m/min),  $D$  o diâmetro da peça a ser usinada (mm) e  $n$  o número de rotação por minuto da máquina (rpm). Os fatores que influenciam a velocidade de corte são: material da ferramenta de corte, material da peça e se há ou não aplicação de fluido de corte. De acordo com Almeida (2007), ao se utilizar velocidades de corte extremas (muito elevadas ou muito baixas) surgem pontos críticos durante a usinagem. A Tabela (1) indica os pontos para essas duas velocidades.

Tabela 1. Pontos críticos devido a baixas e elevadas velocidades (Fonte: Adaptado de Almeida, 2007).

<b>Velocidade elevada</b>	<b>Velocidade baixa</b>
Perda das propriedades mecânicas das ferramentas de corte como sua dureza e tenacidade em consequência de excessivo aquecimento.	Excesso de carga no corte causando falha da ferramenta de corte e muitas vezes causando, também, a rejeição da peça a ser usinada.
Perda da forma e dimensões da peça em função do sobreaquecimento.	Baixa produtividade.
Desgaste prematuro e/ou falha da ferramenta de corte.	

O avanço é o percurso da ferramenta de corte axialmente a cada revolução, sua unidade é milímetros por rotação ( $\text{mm}\cdot\text{rot}^{-1}$ ). Este parâmetro é fundamental no acabamento superficial da peça. A Figura (6) mostra como o acabamento superficial surge devido ao alto avanço e baixo avanço. Ao aumentar o avanço a seção transversal do cavaco também aumenta, ocasionando em uma qualidade superficial inferior ao se comparado ao baixo avanço (Miranda, 2010).

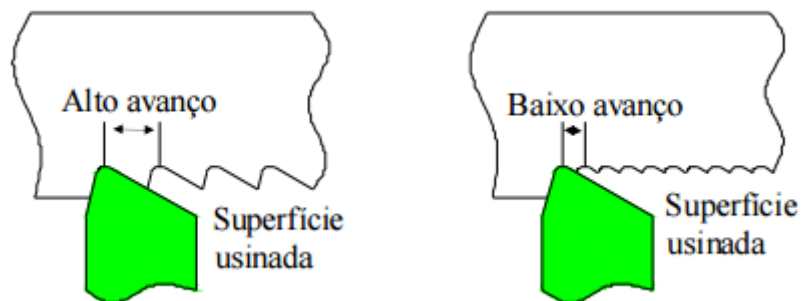


Figura 6. Consequência do alto e baixo avanço (Fonte: Miranda, 2010).

A profundidade de corte é a penetração da ferramenta em relação à peça, medido em milímetros. Este parâmetro na usinagem é importante devido a sua utilização para realizar desbaste (retirada de muito material) ou acabamento (retirada de pouco material). Quando ocorre desbaste a profundidade de corte é superior à do acabamento.

## 2.2. PROCESSO DE FACEAMENTO RÁPIDO

Este ensaio foi proposto por Kraus e Weddel (1934), consiste em facear um disco, utilizando o torno, possuindo rotação e avanços constantes. Tendo como marco inicial a

ferramenta de corte localizada no centro do disco e indo em direção ao diâmetro externo. Este processo causa o aumento da velocidade de corte em função da variação do diâmetro usinado, tal fato irá ocasionar em um determinado ponto, o colapso da ferramenta por deformação plástica da aresta de corte. Este ponto é de fácil visualização na peça final. Na Figura (7) tem-se o detalhamento do faceamento rápido (Amorim, 2003).

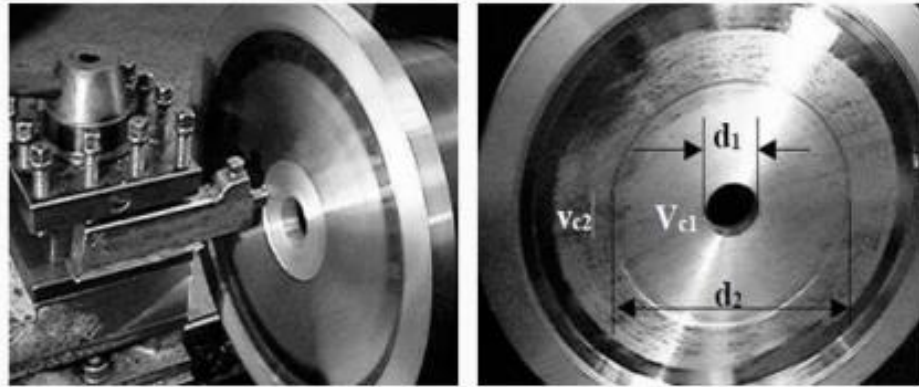


Figura 7. Detalhamento do processo de faceamento rápido (Fonte: Reis, 2015).

O ensaio de faceamento rápido é limitado para ferramentas de aço rápido, e o material da peça deve ser homogêneo para garantir precisão nos resultados. A Equação (2) de Taylor descreve este processo, relacionando a vida da ferramenta ( $T$ ), a velocidade de corte ( $V_c$ ) e as propriedades dos materiais  $k$  e  $x$ .

$$T = K V_c^{-x} \quad (2)$$

O fim da vida útil das ferramentas de corte é regulamentado pela ISO 3685:1993, conforme a Tab. (2).

Tabela 2. Critérios de fim da vida da ferramenta regulamento pela ISO 3685:1993.

<b>Critérios de fim de vida da ferramenta de corte</b>	
Desgaste de flanco médio (mm)	0,3
Desgaste de flanco máximo (mm)	0,6

## 2.3. FERRAMENTAS DE CORTE

Ferramentas de corte são dispositivos que realizam a remoção de cavaco da peça usinada. Portanto, a geometria e o material destas possuem alta influência na peça final.

As ferramentas são principalmente fabricadas pelos seguintes materiais: aço rápido, ligas fundidas, metal duro, cermet, cerâmica, ultraduros como nitreto cúbico de boro e nitreto cúbico de boro policristalino, diamante sintético e natural. Neste trabalho serão utilizadas ferramentas de aço rápido e metal duro.

As ferramentas de aço rápido possuem um limite de operação variando entre 520 a 600°C. Geralmente são adicionadas porcentagens de cobalto para melhorar a dureza a quente, ter maior resistência ao desgaste e menor tenacidade. Já as ferramentas de metal duro possuem elevada dureza, alta resistência à compressão, elevada resistência ao desgaste e sua temperatura de operação pode atingir cerca de 1000 °C. (CIMM,2010)

A norma ABNT NBR ISO 513:2004 é responsável por classificar as ferramentas de metal duro, existem seis classificações, são elas: classe P (aços), classe M (aços inoxidáveis austenísticos), classe K (ferro fundido), classe N (materiais não ferrosos), classe S (superligas e titânio) e classe H (materiais com alta dureza).

Já a norma ABNT NBR 6189: 1982 trata-se das ferramentas de corte de aço ferramenta. As ferramentas de aço rápido são classificadas em dois grupos M (molibdênio) e T (tungstênio).

### 2.3.1. Geometria das Ferramentas

As geometrias das ferramentas de corte geralmente são alteradas para funções específicas no processo de usinagem (Metals Handbook,1989).

Para fabricação de uma ferramenta, Machado *et al.* (2015) inferem definições a respeito da cunha de corte em ferramentas de usinagem:

- Superfície de saída ( $A_y$ ) - é a superfície sobre a qual o cavaco se move;
- Superfície de folga - é a superfície que determina a folga entre a ferramenta e superfície de usinagem, logo existem duas, a principal ( $A_{\alpha}$ ) e a secundária ( $A_{\alpha'}$ );
- Cunha de corte - é a cunha formada pelas superfícies de saída e de folga;
- Arestas de corte - é a interseção das superfícies de saída e de folga.

Na Figura (8) pode ser observado os parâmetros citados acima.

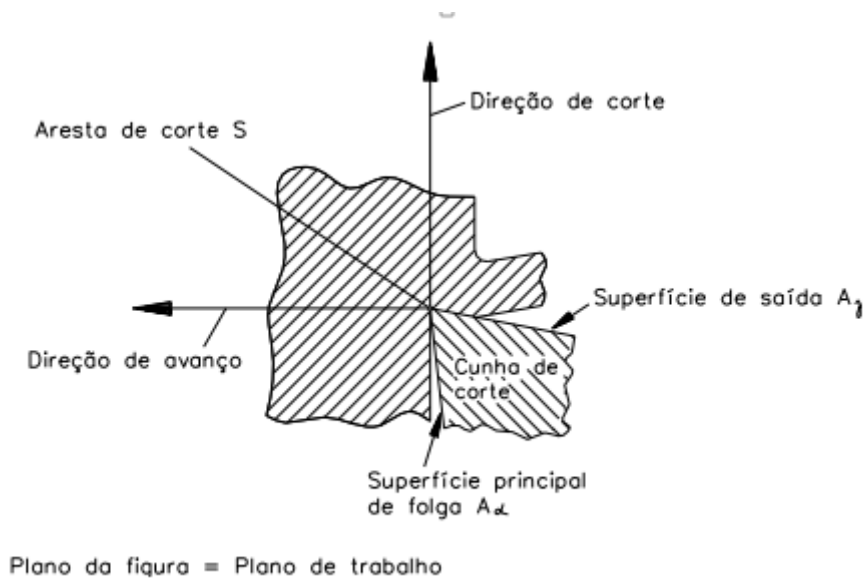


Figura 8. Elementos de uma cunha de corte de uma ferramenta qualquer (Machado *et al.* 2015).

A eficácia de uma ferramenta de corte está atrelada a sua geometria. Esse quesito gera seis influências no processo de usinagem, são eles: força e potência de corte, calor gerado durante o corte, acabamento superficial da peça, desgaste da ferramenta e tipo de cavaco formado (Machado *et al.*, 2015).

Devido à importância da geometria na usinagem, foi necessário elaborar uma norma que abordaria este tema, esta é a NBR 6163 – Conceitos da Técnica de Usinagem: Geometria da Cunha Cortante: Terminologia, a qual define os ângulos da cunha cortante da ferramenta. A geometria da ferramenta é definida de acordo com dois referenciais: sistema de referência da ferramenta, o qual é fundamental no momento de fabricação da ferramenta, e o sistema efetivo de referência, que é de importância no momento da usinagem (Reis, 2000).

### 2.3.1.1. Planos da Ferramenta

De acordo com Reis (2000), existem diversos planos localizados no sistema de referência da ferramenta, os que possuem maior grau de importância são:

- Plano de Referência da Ferramenta ( $P_r$ ): plano que, passando pelo ponto de referência (ponto da ferramenta destinado a determinação das superfícies e ângulos da cunha cortante), é perpendicular à direção admitida de corte. Esta é escolhida de maneira que o plano de referência da ferramenta seja o mais paralelo ou perpendicular possível a uma superfície ou eixo da ferramenta, conforme (Fig.9).



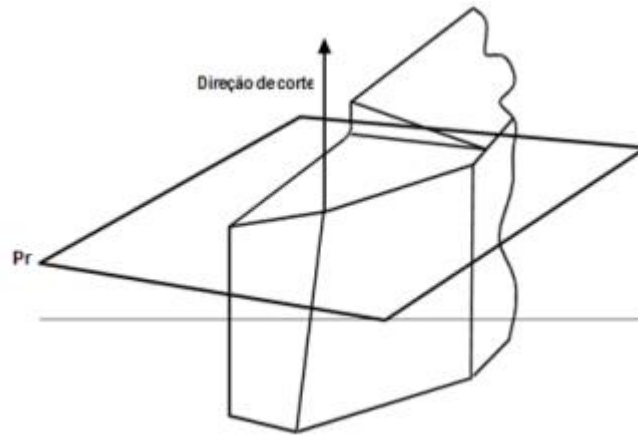


Figura 9. Representação esquemática do plano de referência da ferramenta ( $P_r$ ), (Fonte: Reis, 2000).

- Plano de corte da ferramenta ( $s$ ): plano que, passando pelo ponto de referência, é tangente à aresta cortante e perpendicular ao plano de referência da ferramenta, mostrado na Fig. (10).

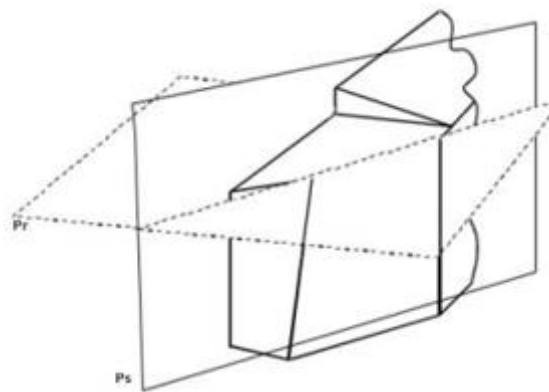


Figura 10. Representação esquemática do plano de corte da ferramenta ( $P_s$ ) (Fonte: Reis, 2000).

- Plano ortogonal da ferramenta ( $P_o$ ): plano que, passando pelo ponto de referência é perpendicular aos planos de referência e de corte da ferramenta, mostrado na Fig. (11).

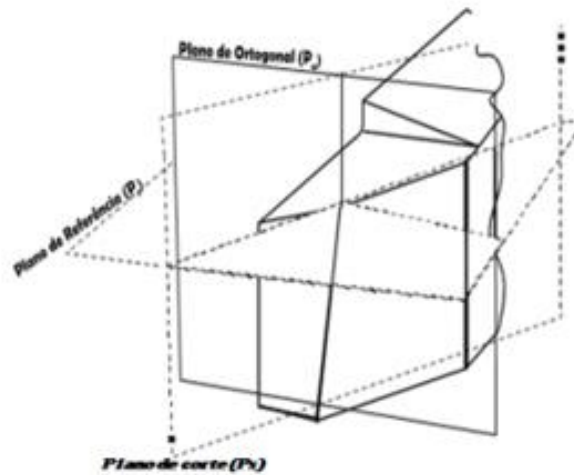


Figura 11. Representação esquemática do plano ortogonal da ferramenta ( $P_o$ ) (Fonte: Reis, 2000).

### 2.3.1.2 Ângulos Principais

Dentre os três ângulos da ferramenta que serão úteis neste trabalho, dois deles são medidos no plano ortogonal, mostrados na Fig. (12), são eles:

- Ângulo de saída da ferramenta ( $\gamma_o$ ): ângulo entre a superfície de saída  $A_y$  e o plano de referência da ferramenta ( $P_r$ );
- Ângulo de folga da ferramenta ( $\alpha_o$ ) - ângulo entre a superfície de saída  $A_x$  e o plano de corte da ferramenta ( $P_s$ ).

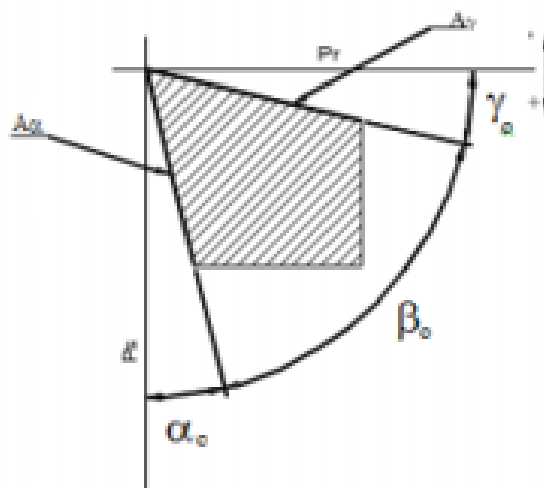


Figura 12. Ângulos da cunha cortante medido no plano ortogonal (Fonte: Reis, 2000).

Já o ângulo de posição é medido em relação aos planos de referência. A Figura (13) ilustra os ângulos de posição. Este está entre o plano de corte da ferramenta ( $P_s$ ) e o plano admitido de trabalho ( $P_f$ ). Este ângulo indicia a posição da aresta cortante. Não há restrições em relação a este ângulo, exceto que a soma do ângulo de posição ( $\nu'_r$ ) com o ângulo de posição secundário da ferramenta ( $X_r$ ) e o ângulo de ponta ( $\epsilon_r$ ) seja  $180^\circ$ .

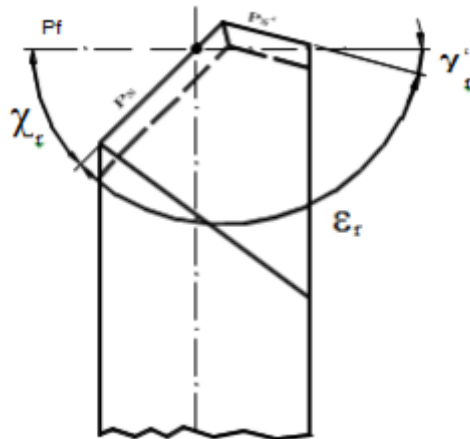


Figura 13. Ângulos de posição medidos no plano de referência (Fonte: Reis, 2000).

Em relação ao ângulo de saída, se este tiver alto valor, menor será os esforços de corte, porém, ocasionará a fragilização e a ferramenta poderá vir ao colapso (Ferraresi, 1977). De acordo com Wertheim *et al* (1994), o valor deste ângulo deve ser de até  $25^\circ$  para facilitar a deformação do cavaco e minimizar as forças de corte

O ângulo de folga, caso ele seja inferior a  $5^\circ$  pode vir a ocorrer o maior contato entre a peça com a superfície de folga da ferramenta, se este ângulo for grande, a ponta da ferramenta se tornará mais frágil, causando, provavelmente, sua quebra durante a usinagem. Geralmente este ângulo está entre  $2^\circ$  a  $14^\circ$  (Diniz, 2013).

## 2.4. TIPOS DE REFRIGERAÇÃO

Com o intuito de refrigerar a ferramenta de corte durante a usinagem, possibilitando o aumento da vida útil da ferramenta, tem-se o método convencional de refrigeração, que faz a utilização de fluidos de corte, a utilização de ar gelado, criogenia e mínima quantidade de lubrificante.

Neste trabalho será utilizado o fluido de corte por jorro e a ar gelado no torneamento.

### **2.4.1. Fluido de corte**

Compreende-se o fluido de corte como sendo qualquer fluido utilizado na usinagem, possuindo classificações que dependem do tipo de operação a ser executada e o material a ser trabalhado. Os fluidos de corte podem ser: óleo de corte integral, óleo emulsificável, fluido sintético e fluido semi-sintético.

O óleo de corte tem como origem mineral, animal ou vegetal, já o óleo emulsificável tem como base uma mistura de óleo mineral com agentes emulsificadores (Silliman, 1992). O fluido sintético é composto por materiais inorgânicos, não possuindo óleo mineral (El Baradie, 1996), por fim, o fluido semissintético é uma mistura de óleo mineral com água (Silliman, 1992).

O fluido de corte possui as duas funções básicas na usinagem: refrigeração e lubrificação. Essas por sua vez, irão reduzir o desgaste da ferramenta de corte, melhorar a qualidade superficial da peça, remover cavacos e reduzir o calor gerado no processo.

#### **2.4.1.1. Sistema Lubri-Refrigerante**

Diniz (2001) verificou que para um fluido de corte ser um bom refrigerante deve possuir 4 qualidades, sendo essas: baixa viscosidade, capacidade de estabelecer um bom contato térmico, alto calor específico e alta condutividade térmica. E para se ter um bom lubrificante, ele deve: resistir a pressões e temperaturas sem vaporizar, boas propriedades antifricção e antissoldantes, e viscosidade baixa.

Logo, um fluido de corte lubri-refrigerante é uma mistura das propriedades do refrigerante e lubrificante. Essa junção irá facilitar a dissipação de calor e diminuir o coeficiente de atrito no processo de usinagem.

O fluido de corte lubri-refrigerante é largamente utilizado, pois o refrigerante não consegue acessar a área da superfície de corte devido à alta pressão, sendo esta função feita pelos lubrificantes (Attanasio, 2005). EL Baradie (1996) constatou que, este tipo de fluido de corte consegue alcançar a área de contato, melhorar a lubrificação da ferramenta, expulsar os cavacos, e reduzir a tensão de cisalhamento. Tais fatos possibilitam uma maior vida da ferramenta de corte, e melhor acabamento superficial da peça.

### **2.4.2. Tubo Vórtices**

Ranque em 1930 projetou um dispositivo mecânico capaz de gerar dois fluxos em sentidos contrários com temperaturas diferentes, baseando-se exclusivamente na sua geometria, com apenas uma entrada de fluido de gás comprimido. Este equipamento ficou conhecido como tubo vórtices.

Desde então este dispositivo tem sido estudado cada vez mais a fim de verificar sua eficiência e possíveis aplicações. A otimização de geometria, funcionamento, equações que

regem o dispositivo, instrumentação para medição de eficiência e possíveis aplicações, estão sendo melhores analisadas para aprimorar este dispositivo.

As temperaturas alcançadas por este tubo são significativas, variando entre **- 46 °C a 127 °C (Patwari, 2014).**

#### 2.4.2.1. Funcionamento

O tubo vórtices possui uma única ou várias entradas de ar comprimido, uma câmara de vórtice, um duto de saída de ar frio e um duto de saída de ar quente. Válvulas podem ser adicionadas para auxiliar no escoamento do fluido e para regular a quantidade de saída mássica de ar frio e quente (Silva, 2014).

Existem diversas teorias que tentam explicar o fenômeno que ocorre para que haja a separação térmica. A que há mais adeptos, é que os vórtices internos e externos possuem mesma direção e velocidade angular. O princípio da conservação do momento angular garante que o fluxo interno deveria ser maior que o externo, porém neste caso ele é violado, os fluxos possuem a mesma velocidade. O vórtice externo se aquece devido à energia perdida pelo vórtice interno. Dessa maneira, há a separação térmica, o fluxo externo se aquece e o interno se resfria (Gao, 2005).

Este equipamento pode ser encontrado de dois modos: unifluxo e contrafluxo, o que diferem os dois é a maneira que o ar sai para atmosfera.

O dispositivo com saída de ar do tipo unifluxo é dado pela saída de ar em apenas uma direção e sentido, tendo assim apenas uma entrada e uma saída de ar. A Figura (14) demonstra o princípio do funcionamento desta configuração. O ar comprimido é injetado tangencialmente na câmara de vórtice, e são gerados dois fluxos. O fluxo interno é responsável pela saída de ar frio, e o externo pela saída de ar quente, ambos possuem o mesmo sentido. A separação térmica é realizada por uma válvula na extremidade do tubo. Esta maneira com o que os fluxos de ar saem para atmosfera, ocasiona em uma baixa utilização desta configuração (Cockerill, 1998).

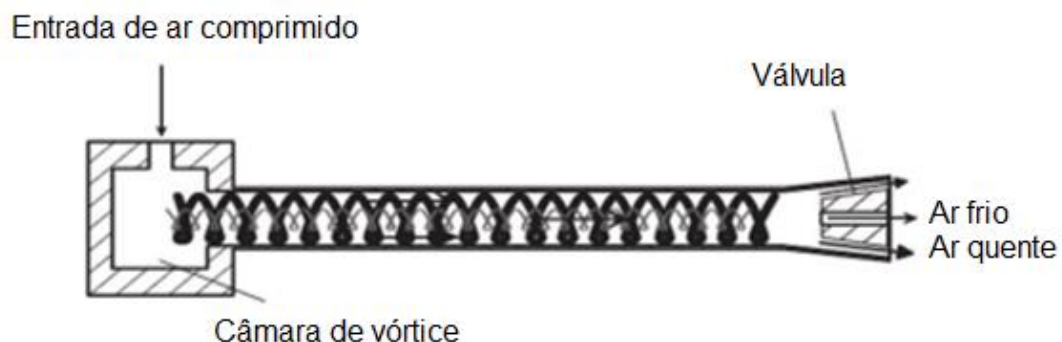


Figura 14. Funcionamento do tubo vórtices unifluxo (Fonte: Adaptado de Gao, 2005).

O dispositivo com saída de ar do tipo contrafluxo é dado pela saída de ar em duas direções de sentidos opostos, tendo assim uma entrada de ar comprimido e duas saídas de ar. A Figura (15) demonstra o funcionamento do sistema contrafluxo. Nesta o ar comprimido é injetado tangencialmente na câmara de vórtice, isto gera um fluxo de ar quente que irá percorrer o tubo até encontrar a válvula de controle, uma parcela do fluxo quente sai para atmosfera, e a outra retorna, choca com a válvula e retorna pelo centro do tubo possuindo menor temperatura (Cockerill, 1998).

A principal mudança em relação à anterior é em relação à saída dos fluxos de ar. Neste, cada um sairá por uma extremidade. Também há adição da válvula de controle, esta permitirá regular a saída mássica do sistema.

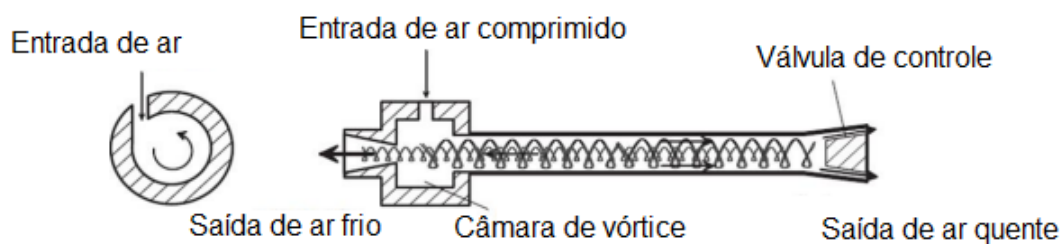


Figura 15. Funcionamento do tubo vórtices contrafluxo (Fonte: Adaptado de Gao, 2005).

#### 2.4.2.2. Geometria

A eficiência deste dispositivo está atrelada a alguns parâmetros como a dimensão do tubo, geometria da válvula de ar quente e entrada. Para melhor exemplificação de como estão dispostas as peças e componentes do tubo vórtices a Fig. (16) explicita a nomenclatura destes componentes para melhor entendimento.

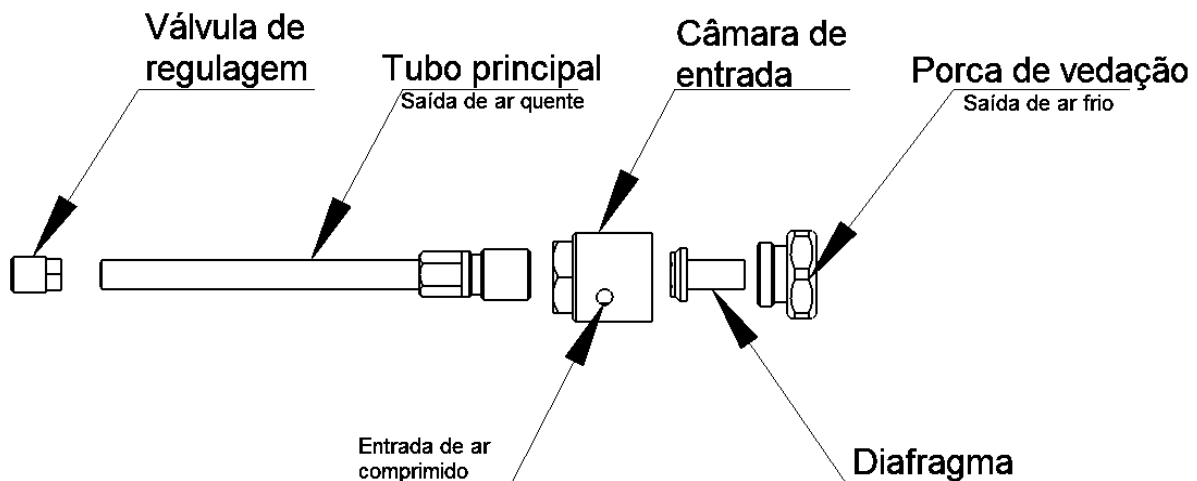


Figura 16. Componentes do tubo vórtices (Fonte: Autores, 2016).

Os principais pontos a serem analisados na dimensão do tubo são: comprimento do tubo de ar quente ( $L$ ), diâmetro do bocal de entrada de ar comprimido ( $d_e$ ), diâmetro do tubo ( $D_T$ ) e diâmetro de saída de ar frio ( $d$ ). Para melhor entendimento das dimensões do dispositivo as Fig. (17) e Fig. (18) mostram a localização exata das cotas destas dimensões no tubo vórtices.

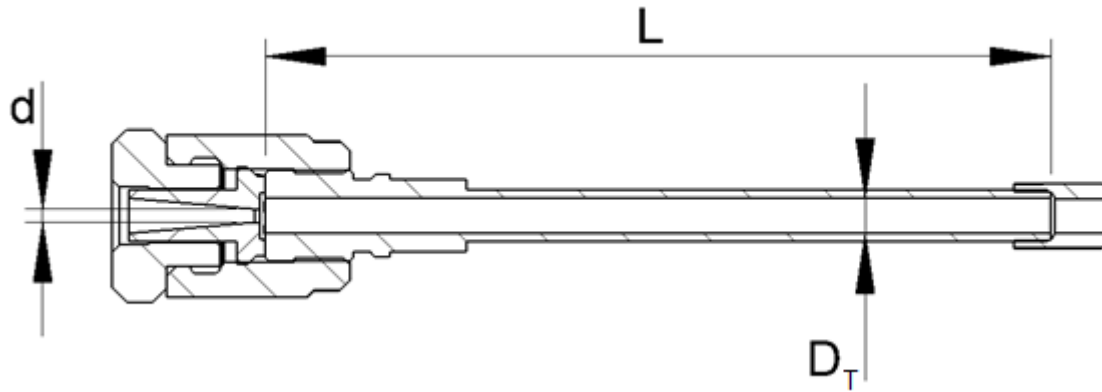


Figura 17. Dimensões do tubo vórtices (Fonte: Autores, 2016).

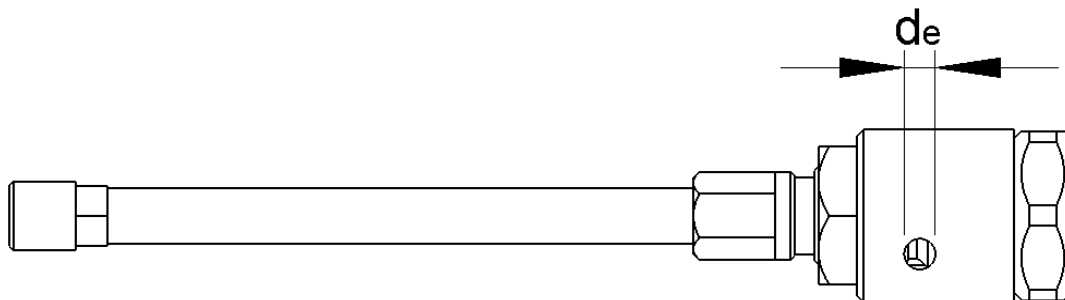


Figura 18. Dimensões do tubo - Diâmetro do bocal de entrada de ar comprimido (Fonte: Autores, 2016).

O comprimento do tubo de ar quente é uma dimensão que foi analisada por diversos pesquisadores, sabe-se que há uma relação entre esse comprimento e o diâmetro do tubo. Martynovskii e Alekseev (1957) afirmam que para que haja separação térmica essa relação ( $L/D_T$ ) deve ser de no mínimo 10. Saidi e Valipour (2003) em seus experimentos obtiveram essa relação variando entre 20-55, onde acima de 55 o efeito não iria ocorrer.

Segundo Im e Yu *et al.* (2011), a geometria do bico de entrada de ar possui influencia considerável no equipamento. Um bocal com menor diâmetro iria produzir baixas velocidades

tangenciais e uma separação de baixa temperatura, já um bocal grande, o vórtice que deveria ser ocasionado não iria se estabelecer ocasionando em uma baixa separação térmica.

De acordo com Aljuwayhel *et al.* (2005), a partir de seus estudos e baseado em simulações computacionais observaram que há menos separação térmica quando o diâmetro interno do tubo é aumentado. Obtiveram que era inversamente proporcional a relação entre a magnitude da velocidade angular e o aumento do diâmetro do tubo.

Im e Yu *et al.* (2011), analisaram também o diâmetro de saída de ar frio, a relação  $d/D_T$  deveria estar entre 0,4 e 0,6. Em análises experimentais Saidi e Valipour (2003) mostraram que essa relação foi validada, sendo a mais eficiente 0,5, o que resultaria em uma maior variação de temperatura. Os dados experimentais podem ser vistos no gráfico da Fig. (19).

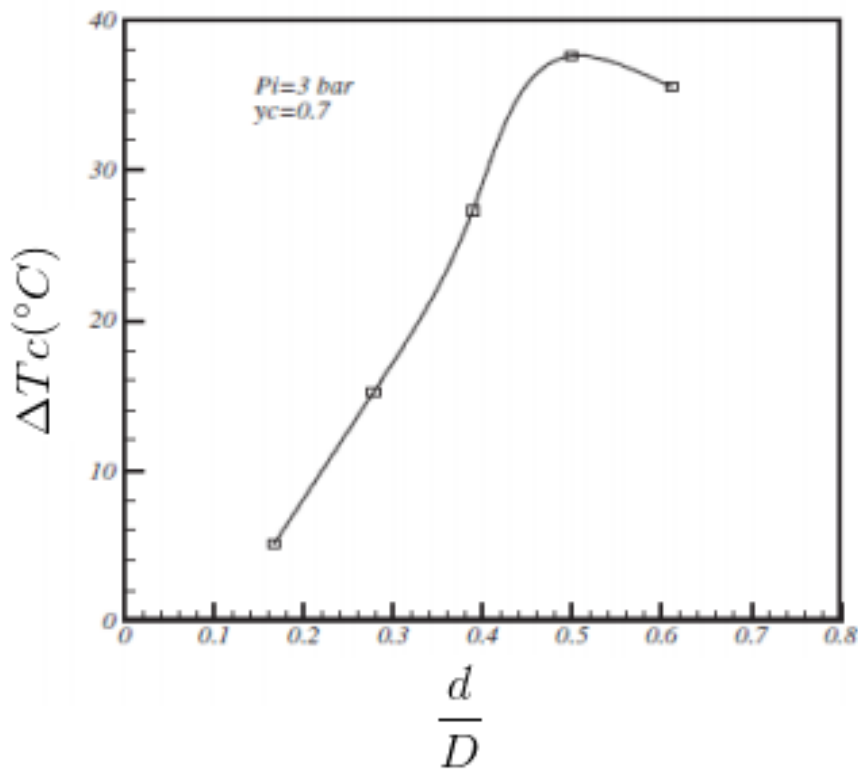


Figura 19. Relação  $d/D$  e variação de temperatura (Fonte: Adaptado de Saidi e Valipour, 2003).

Saidi e Valipour (2003) estudaram a geometria do bocal de entrada. Para isto fabricaram duas peças, que podem ser vistas na Fig. (20). Os autores verificaram que com o aumento na quantidade de sulcos no bocal, o fluxo torna-se turbulento, ocasionando uma baixa eficiência, como pode ser visto na Fig. (21), conforme explicitado no gráfico referente. Foi observado que o bocal com três sulcos foi o que obteve os melhores resultados.



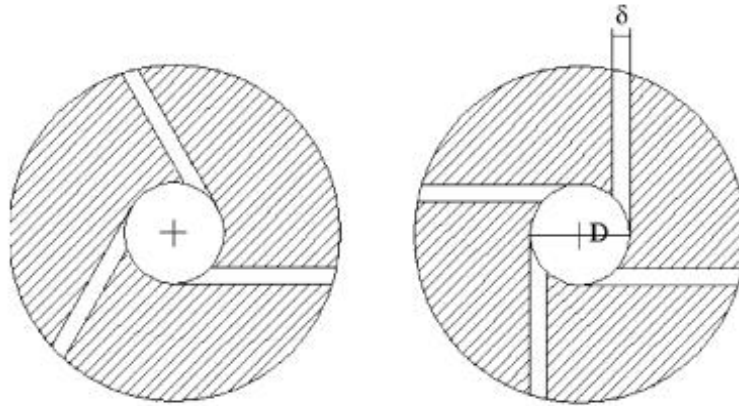


Figura 20. Geometria do bocal de entrada (Fonte: Saidi e Valipour, 2003).

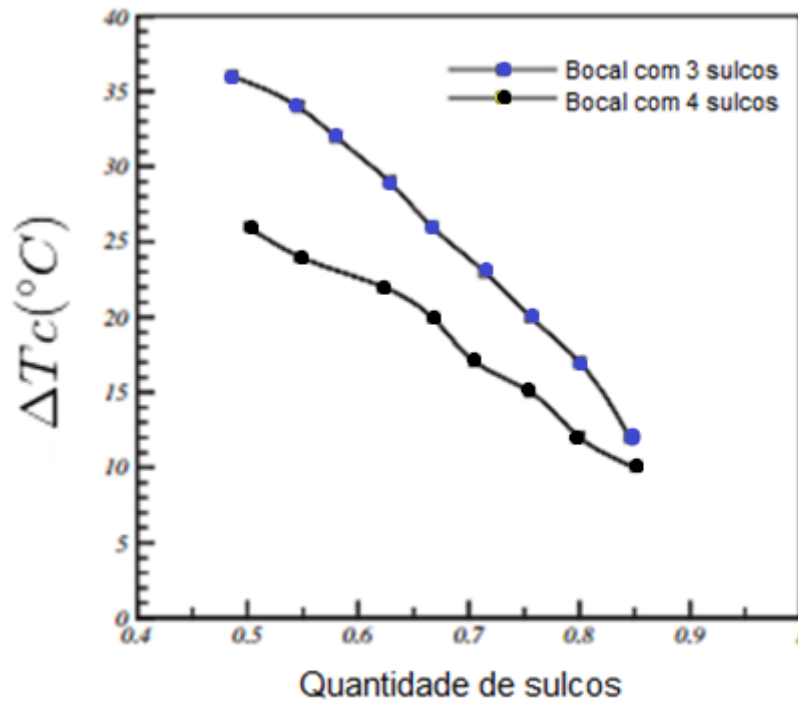


Figura 21. Quantidade de sulcos e variação de temperatura (Fonte: Adaptado de Saidi e Valipour, 2003).

Gao (2005), analisou a válvula de ar quente com 3 geometria diferentes: esférica, formato de placa e formato cônico, Fig. (22). A eficiência do dispositivo é dada pela capacidade do mesmo em diminuir a temperatura de saída, fazendo com que a saída de ar frio atinja sua menor temperatura experimental. O autor conclui, com seus experimentos, que a geometria da válvula

não afeta consideravelmente a eficiência. Essa válvula possui a capacidade de regular a saída mássica de ar frio.

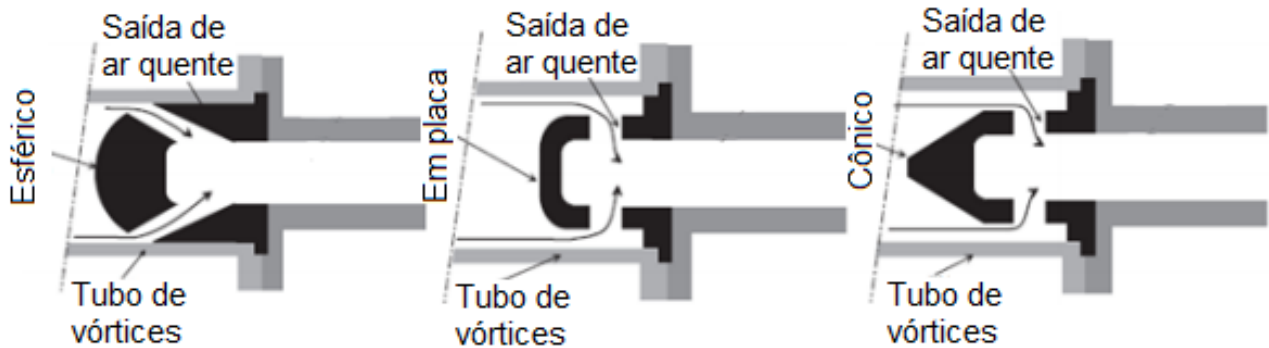


Figura 22. Geometria da válvula de ar quente (Fonte: Adaptado de Gao, 2005).

#### 2.4.2.3. Usinagem com ar comprimido a frio - Tubo Vórtices

Uma das vantagens da utilização de ar comprimido a frio no processo de usinagem é a independência de fluidos refrigerantes e trocadores de calor, proporcionando assim uma maior versatilidade no posicionamento do dispositivo (Cockerill, 1998).

As temperaturas, fluxos e refrigeração podem ser controlados, proporcionando as especificações requeridas pelo operador através da válvula de regulagem, podendo chegar a temperaturas relativamente baixas. Com a diminuição da temperatura no processo de usinagem a vida útil da ferramenta é elevada, além de proporcionar um melhor acabamento superficial na peça usinada. Estes são fatores que corroboram com as vantagens do tubo vórtices na usinagem.

Um dos fatores que colaboram para a redução da vida útil da ferramenta é a elevada temperatura com que a mesma trabalha. Com base nisto a utilização de ar frio na ponta da ferramenta diminui o desgaste, aumentando assim o seu tempo de usinagem.

A temperatura de trabalho e a vazão com que o dispositivo é acionado pode ser regulada através da válvula de regulagem. Abaixo uma configuração da aplicação do tubo vórtices na usinagem, ilustrada pela Fig. (23). A Figura (24) ilustra este dispositivo no torneamento.

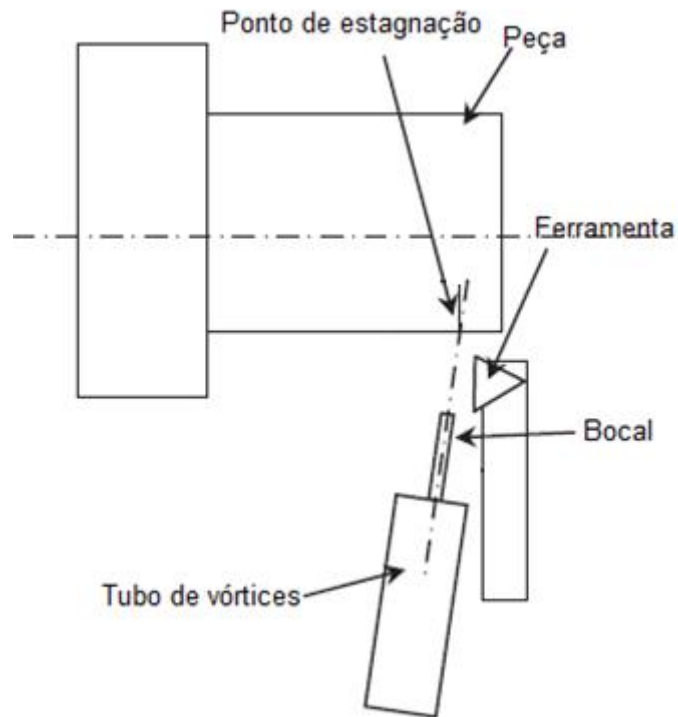


Figura 23. Configuração de usinagem utilizando tubo vórtices (Fonte: Adaptado de Liu e Chou, 2007).

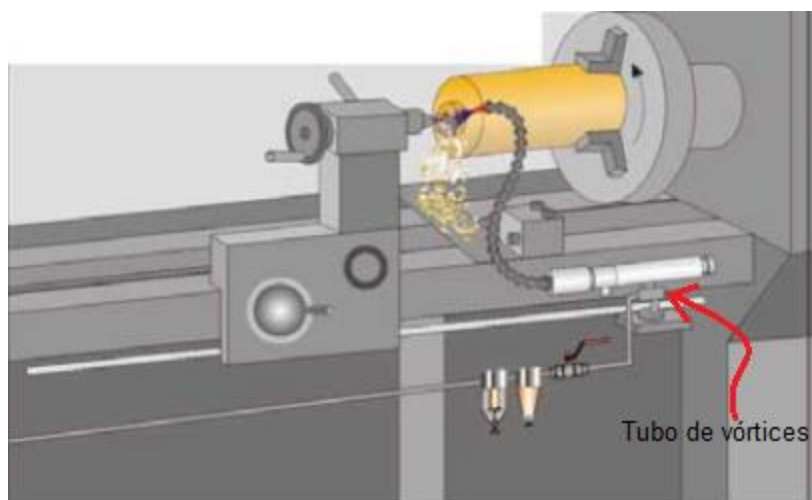


Figura 24. Tubo vórtices no processo de torneamento (Fonte: Nex-flow, 2016).

A fim de verificar o desempenho do tubo vórtices quanto as temperaturas de saída, tanto a saída de ar frio quanto a saída de ar quente, algumas técnicas de medições são aplicadas. Alguns pesquisadores desenvolveram a técnica termográfica por infravermelho, atuando na investigação de temperatura sobre o ponto de corte na ponta da ferramenta. Esta técnica consiste em análise

não destrutiva, além de se tratar de um exame térmico rápido com larga escala de capacidade de detecção de ondas térmicas a partir de certa distância (Almond e Peng, 2001).

Atualmente são preferíveis câmeras de alta resolução pelo fato desta possuir uma maior capacidade de obtenção de distribuição da temperatura em dada superfície (Selek *et al*, 2011). A Figura (25) ilustra a configuração experimental por meio de câmera termográfica.

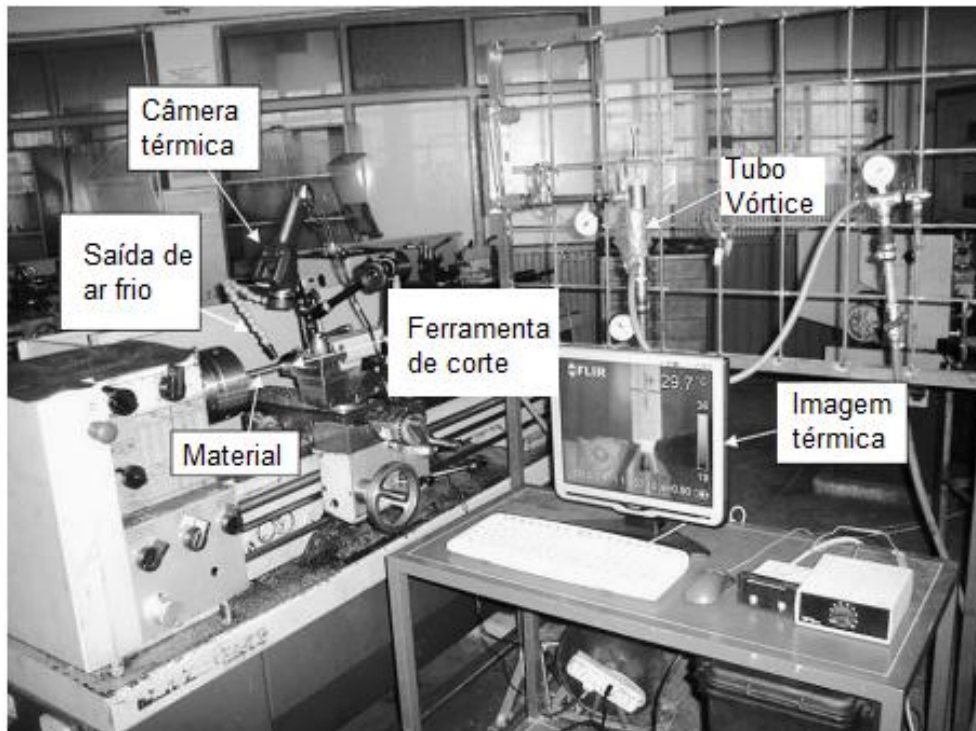


Figura 25. Configuração experimental - Câmera Termográfica (Fonte: Adaptado de Selek et al 2011).

As vantagens deste processamento de sinais térmicos são dadas pela facilidade de implementação, além de ser uma análise não destrutiva. Os ruídos obtidos na análise são irrelevantes, uma vez que os dados do processo podem ser ajustados, os cálculos são realizados rapidamente.

## 2.5. FERRO FUNDIDO

Os ferros fundidos são ligas de ferro que contém mais de 2% de carbono e até 3% de silício (Callister, 2002). Os ferros fundidos mais conhecidos são: cinzento, vermicular e nodular. Tendo em vista uma produção mais econômica os ferros fundidos são utilizados para fabricação de peças com alta complexidade geométrica. Devido à boa fluidez do ferro fundido, este material consegue se adequar para fabricação de peças complexas. Na indústria automotiva é bastante

utilizado em motores a combustão interna, disco de freio, placas de embreagens e anéis de pistão.

### 2.5.1. Propriedades Mecânicas

Os ferros fundidos possuem elevadas temperaturas de fusão. Possuem teor de carbono entre 2,5% e 4% e teor de silício entre 1,0% e 3,0%. No processo de fabricação durante a solidificação e resfriamento sofrem contração moderada. A Tabela (3) ilustra as propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento, vermicular e nodular.

Tabela 3. Propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento, vermicular e nodular (Fonte: Adaptado de Norma SAE J 1887:2002).

<b>Propriedades</b>	<b>Cinzento</b>	<b>Vermicular</b>	<b>Nodular</b>
Limite de resistência a tração (MPa)	55	100	155
Limite de escoamento (MPa)	-	100	155
Módulo de elasticidade (GPa)	75	100	110

O ferro fundido cinzento tem resistência mecânica menor quando comparado com o ferro fundido vermicular e nodular. O ferro fundido nodular por sua vez possui maior limite de resistência, de escoamento, além de um maior módulo de elasticidade comparado com o ferro fundido cinzento e vermicular (White, 1998).

### 2.6. AÇO SAE 1045

Aços são ligas metálicas possuindo em sua microestrutura o valor máximo de aproximadamente 2 % de carbono. O aço utilizado neste trabalho é caracterizado por possuir aproximadamente 0,45% de carbono em sua microestrutura, sendo considerado um aço de teor médio de carbono. A aplicação deste pode ser vista na fabricação de peças na indústria metal-mecânica, devido principalmente a sua boa resistência mecânica e usinabilidade quando comparado aos aços ligados e endurecidos.

### 2.6.1. Propriedades mecânicas do aço SAE 1045

O aço SAE 1045 possui temperatura de fusão por volta de 1450 °C. Possui teor de carbono entre 0,43% e 0,5%, teor de silício entre 0,1% e 0,6%, e teor de manganês 0,6% e 0,9%. A Tabela (4) indica as propriedades mecânicas do aço SAE 1045. Devido a estas propriedades, o aço SAE 1045 é muito utilizado na confecção de engrenagens, eixos, polias, parafusos, dentre outras peças do setor metal-mecânico (Metals Handbook,1991).

Tabela 4. Propriedades mecânicas do aço SAE 1045 (Fonte: Adaptado de Metals Handbook,1991).

<b>Propriedades Aço SAE 1045</b>	
Limite de resistência a tração (MPa)	560
Limite de escoamento (MPa)	310
Módulo de elasticidade (GPa)	250

### 3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A seguir são apresentados os materiais e a metodologia necessários para execução deste trabalho. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Materiais e no Laboratório de Fabricação da UnB-FGA.

#### 3.1. MATERIAIS

##### 3.1.1. Medição da eficiência térmica do dispositivo

Para o experimento de medição de temperatura no dispositivo foram utilizados os seguintes materiais:

- **Câmetra** termográfica - Fluke Ti90;
- Compressor Schulz 175 lbf/pol<sup>2</sup>;
- Filtro de ar regulador, Série-D LFERS - Festo;
- Mangueira pneumática de poliuretano  $\Phi$  10 mm;
- Tubo Vórtices desenvolvido pelo Senai - Ítalo Bologna de Goiânia-GO (Apêndice A).

##### 3.1.2. Medição de temperatura no torneamento cilíndrico externo e ensaios de vida no faceamento rápido nos pré-testes e definitivos

Para os experimentos de medição de temperatura no torneamento cilíndrico externo, e ensaio de faceamento rápido foram utilizados os seguintes materiais:

- Béquer graduado com capacidade 1000 ml- Nalgon;
- *Bits* de aço-rápido da classe M2 com 10% de cobalto e seção quadrada - 3/8" x 3/8" e 6" de comprimento;
- Broca de centro de aço rápido de 3,15 x 8,00 mm;
- Câmera termográfica - Fluke Ti90;
- Compressor Schulz 175 lbf/pol<sup>2</sup>;
- Cronômetro Digital - Incoterm;
- Dispositivo de regulagem para mangueiras de fluido - Fabricação Artesanal;
- Ferramenta de corte de aço-rápido Bedame N151 2-300;
- Insertos de metal duro Classe K;
- Insertos de metal duro Classe P;
- Fluido de corte solúvel sintético de base vegetal ME-3 - Quimatic/Tapmatic;
- Mangueira pneumática de poliuretano diâmetro de 10 mm;

- Refratômetro 0-32% brix - ATC;
- Relógio comparador com resolução de 0,01 mm - Mitutoyo;
- Paquímetro de 6" - Starrett;
- Serra de Fita - Máquina Gravitacional e Manual S3420NG - Starrett;
- Suporte para câmera termográfica - Fabricação Artesanal;
- Disco de Aço SAE 1045 com diâmetro de 200 mm e 60 mm de espessura;
- Tarugo de Aço SAE 1045 com diâmetro de 50,8 mm e 200 mm de comprimento;
- Tarugo de Ferro Fundido Cinzento FC250 com diâmetro de 40 mm e 150 mm de comprimento;
- Torno convencional modelo Mascote MS-205 - Nardini;
- Tubo vórtices desenvolvido pelo Senai - Ítalo Bologna de Goiânia-GO.

### 3.1.3. Ensaio metalográfico

Para o experimento de metalografia foram utilizados os seguintes materiais:

- Amostra de Aço SAE 1045 com diâmetro de 35 mm e 25 mm de espessura;
- Amostra de Ferro Fundido Cinzento FC250 com diâmetro de 35 mm e 15 mm de espessura;
- Lixa d'Água 225 x 275 mm grão 100 - Norton;
- Lixa d'Água 225 x 275 mm grão 240 - Norton;
- Lixa d'Água 225 x 275 mm grão 320 - Norton;
- Lixa d'Água 225 x 275 mm grão 400 - Norton;
- Lixa d'Água 225 x 275 mm grão 600 - Norton;
- Lixa d'Água 225 x 275 mm grão 800 - Norton;
- Lixa d'Água 225 x 275 mm grão 1200 - Norton;
- Microscópio ótico FM-700, marca Pantec;
- Pano para polimento tecido de poliéster TFI - Arotec;
- Pasta de diamante de granulometria 0,25 µm;
- Politriz polipan-2D, marca Pantec;
- Solução de 2% de Nital.



## 3.2. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais realizados neste trabalho. Estes são compostos pelas seguintes etapas:

- Medição da eficiência térmica do dispositivo:
  - Medição de temperatura com pressão de 4 bar
  - Medição de temperatura com pressão de 6 bar
  - Medição de temperatura com pressão de 8 bar
  
- Medição de temperatura com câmera termográfica no torneamento cilíndrico externo do Ferro Fundido Cinzento FC250:
  - Medição de Temperatura a Seco
  - Medição de Temperatura com Jorro
  - Medição de Temperatura com Tubo Vórtices
  
- Medição de temperatura com câmera termográfica no torneamento cilíndrico externo do Aço SAE 1045:
  - Medição de Temperatura a Seco
  - Medição de Temperatura com Jorro
  - Medição de Temperatura com Tubo Vórtices
  
- Faceamento rápido no torneamento do Aço SAE 1045:
  - Ensaio de Vida de Ferramenta a Seco
  - Ensaio de Vida de Ferramenta com Jorro
  - Ensaio de Vida de Ferramenta com Tubo Vórtices
  
- Caracterização do Ferro Fundido Cinzento FC250:
  - Ensaio Metalográfico do Ferro Fundido Cinzento FC250
  
- Caracterização do Aço SAE 1045:
  - Ensaio Metalográfico do Aço SAE 1045
  
- Análise de custos
  - Comparação dos custos do tubo vórtices e a jorro através do ensaio de faceamento rápido do aço SAE 1045

O fluxograma da Fig. (26) resume a metodologia de trabalho proposta para atingir os objetivos informados no capítulo 1. De início, realizou-se a medição de temperatura nas saídas quente e fria do tubo vórtices com câmera termográfica mediante três variações - 4,6 e 8 bar -, em seguida foram realizados os ensaios de vida de ferramenta no faceamento rápido do aço SAE 1045 com três variações - a seco, com jorro e com aplicação do tubo vórtices. Posteriormente, procedeu-se com os ensaios de medição de temperatura com câmera termográfica no torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045 e ferro fundido cinzento FC250, também com três variações - a seco, com jorro, e com aplicação do tubo vórtices. Por fim, realizou-se as caracterizações do ferro fundido cinzento FC250 e do aço SAE 1045 por meio de ensaios metalográficos.

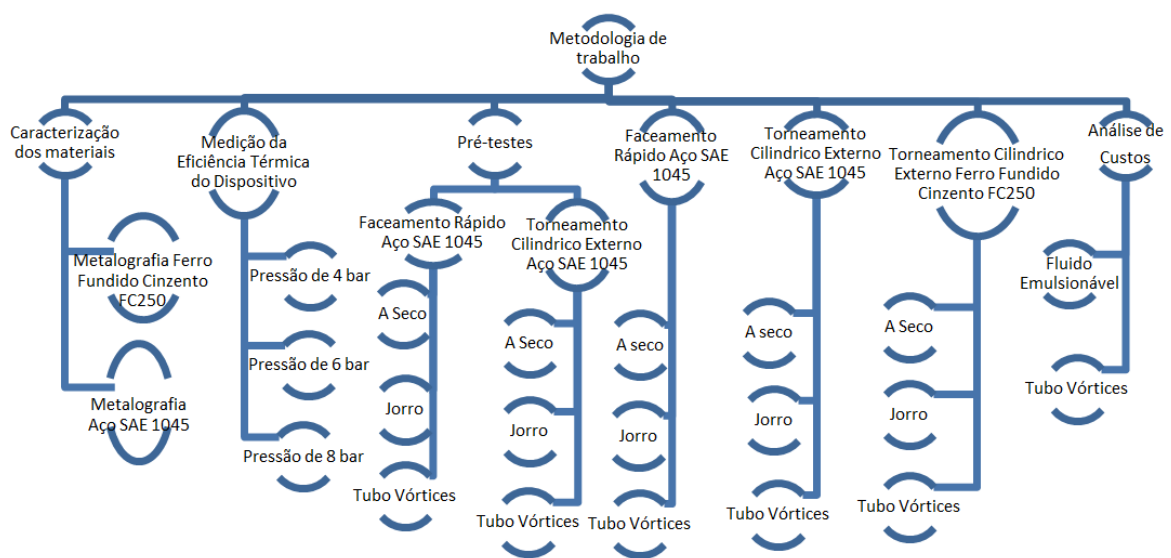


Figura 26. Fluxograma da metodologia de trabalho proposta (Fonte: Autores, 2016).

Os procedimentos adotados em cada uma das etapas são detalhados a seguir.

### 3.2.1. Medição de Temperatura no Tubo Vórtices

Escolheu-se a câmera termográfica para verificação do funcionamento do tubo vórtices, cujo objetivo foi medir as temperaturas de entrada e saída do tubo. A câmera termográfica tem como principal objetivo exibir uma imagem da radiação térmica emitida por um corpo. As imagens capturadas pela câmera térmica Fluke Ti90 foram processadas por meio do *software SmartView*, identificou-se o gradiente de temperatura, através de uma linha, a qual capta a região a ser mensurada, inserida no arquivo.

Inicialmente ajustou-se a tubulação de ar comprimido para o perfeito funcionamento do tubo vórtices no local desejado. Foi preciso alimentar o dispositivo com um regime controlado de

pressão para que houvesse a regulação e medição da quantidade de pressão com que o dispositivo é alimentado. O ar comprimido gerado pelo compressor Schulz 175 lbf/pol<sup>2</sup> passa por um filtro de ar regulador com entrada e saída de ¼pol até que chegue no dispositivo, a pressão desejada.

### 3.2.2. Pré-testes

Nesta etapa do trabalho, realizou-se os ensaios preliminares com o intuito de observar se os parâmetros dos ensaios estavam corretos e caso não estivessem, seriam alterados. Foram realizados dois procedimentos iniciais, o faceamento rápido e a medição de temperatura com câmara térmica no torneamento cilíndrico externo, ambos utilizando aço SAE 1045.

#### 3.2.2.1. Faceamento rápido no torneamento do aço SAE 1045

Neste ensaio foi utilizado um torno convencional Nardini modelo Mascote MS-205, utilizando ferramentas (bits) de aço-rápido da classe M2 com 10 % de cobalto e seção quadrada 3/8" x 3/8" e 6" de comprimento, um disco de aço ABNT 1045 com diâmetro de 200 mm e 60 mm de espessura.

Este procedimento consistiu em facear o disco, com o auxílio do torno, tendo rotação e avanço constantes. O marco inicial a ferramenta de corte foi no centro do disco e indo em direção ao diâmetro externo. Ocasiona-se, devido a locomoção da ferramenta, um aumento na velocidade de corte. Consequentemente, em um determinado local do disco, observou-se o colapso da ferramenta. Esta região é de fácil visualização na superfície usinada (Amorim, 2003).

Na Figura (27) pode ser observada a montagem do experimento.



Figura 27. Montagem do experimento de faceamento rápido (Fonte: Autores, 2017).

A Tabela (5) indica os parâmetros utilizados no ensaio de faceamento rápido do aço ABNT 1045. A afiação da ferramenta foi realizada manualmente com a utilização do goniômetro para garantir a angulação desejada.

Tabela 5. Condições de corte e geometria da ferramenta no faceamento rápido do Aço ABNT 1045 (Fonte: Autores, 2017).

<b>Ensaio de Faceamento Rápido do Aço ABNT 1045</b>	
Rotação (rpm)	400
Avanço (mm/rot)	0,167
Profundidade de corte (mm)	0,5
Ângulo de saída (graus)	12
Ângulo de folga (graus)	8
Ângulo de posição (graus)	75

As condições de corte foram iguais para todos os ensaios. Os modos de refrigeração da ferramenta foram diferentes, sendo elas a seco, com jorro de fluido de corte e ar comprimido refrigerado com a utilização do Tubo Vórtices. Para estas três condições observou-se a vida útil da ferramenta, por meio do seu colapso por deformação plástica.

Para cada condição realizou-se três ensaios. A Figura (28) ilustra o ensaio de faceamento rápido a seco.



Figura 28. Faceamento rápido a seco (Fonte: Autores, 2017).

Para a aplicação do fluido de corte em jorro utilizou-se o bocal de injeção já instalado no torno com fluido emulsionável ME-3 Quimatic/Tapmatic na proporção 1:10, ou seja, 1 parte de óleo e 10 partes de água. A porcentagem do fluido utilizada foi de 5,2% na escala Brix (Fig. 29), esta permite analisar a concentração do fluido de corte na solução contida no reservatório. De acordo com o fabricante do fluido de corte, a porcentagem que deve ser utilizada para este tipo de usinagem deve variar de 5% até 10%. A vazão com que o fluido de corte é aplicado na ferramenta foi de 2,7 L/min, bem como um ângulo de incidência de 23 graus com relação a face da peça e uma distancia de 58 mm da ferramenta. A Figura (30) ilustra o ensaio de faceamento rápido com aplicação de jorro de fluido de corte.

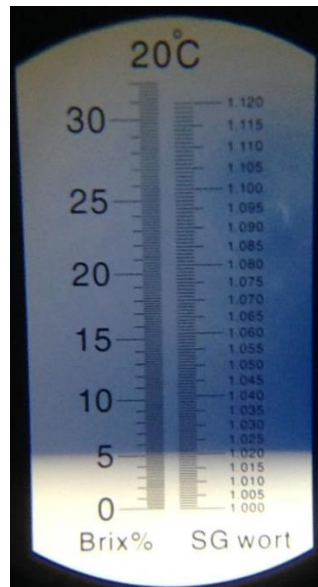


Figura 29. Porcentagem de fluido de corte na escala Brix (Fonte: Autores, 2017).



Figura 30. Faceamento rápido com jorro de fluido de corte (Fonte: Autores, 2017).

Para os ensaios de faceamento rápido com a utilização do tubo vórtices, o dispositivo foi fixado no torno com pressão de entrada de 8 bar, uma vez que essa pressão teve o melhor desempenho na diminuição da temperatura na saída de ar frio do tubo vórtice, como mostra a Tab. (11). O fluxo de ar é injetado na direção da ferramenta de corte com um ângulo de incidência de 34 graus com relação à face da peça e uma distancia de 18 mm da ferramenta. A Figura (31) ilustra o ensaio de faceamento rápido com a utilização do tubo vórtices.



Figura 31. Faceamento rápido com utilização do Tubo Vórtices (Fonte: Autores, 2017).

### **3.2.2.2. Caracterização do Diâmetro Usinado**

O objetivo desta etapa foi identificar a posição do ressalto formado na peça usinada, ocasionado pela deformação plástica da ferramenta durante a usinagem, e medir o diâmetro torneado. O ressalto na face do disco, formado pela deformação plástica da ferramenta, pode ser visto sem o auxílio de equipamentos, porém para padronizar os ensaios, normalizou-se um valor de ressalto de 0,3 mm, sendo este medido através de um relógio comparador Mitutoyo com resolução de 0,01 mm. A Figura (32) ilustra a medição do degrau formado. Depois de localizado esta região, mensurou-se o diâmetro usinado com o auxílio de um paquímetro.

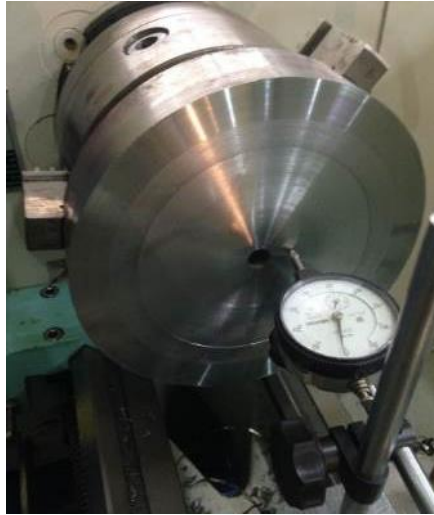


Figura 32. Montagem do relógio comparador para medição do ressalto formado (Fonte: Autores, 2017).

### **3.2.2.3. Medição de temperatura com câmera termográfica no torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045**

Neste ensaio o objetivo foi medir a temperatura na superfície de saída da ferramenta, o mais próximo da aresta de corte, a fim de comparar tais temperaturas com os diferentes tipos de refrigeração aplicados, condição lubri-refrigerante - com aplicação de fluido de corte em abundância (jorro) - e também a seco, no torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045.

Nesta etapa utilizou-se um torno convencional Nardini modelo Mascote, insertos de metal duro da classe P revestidos de  $TiN+Al_2O_3$ , um tarugo de aço SAE 1045 com diâmetro de 50,8 mm e comprimento de 500 mm. Para a aplicação do fluido de corte em jorro utilizou-se o bocal de injeção já instalado no torno com fluido de corte solúvel sintético de base vegetal ME-3 - Quimatic/Tapmatic, a vazão com que o fluido foi aplicado foi de 0,35 L/min. A porcentagem do fluido utilizada foi de 5,2% na escala Brix, semelhante a do ensaio de faceamento rápido. Para os ensaios utilizando tubo vórtices, fixou-se a pressão de entrada de 8 bar, uma vez que essa pressão teve o melhor desempenho na diminuição da temperatura na saída de ar frio do tubo vórtice.

A medição da temperatura na ferramenta de corte foi realizada utilizando-se uma câmera termográfica Fluke, fixada através de um suporte ajustado no carro do torno, projetando assim uma imagem focada na superfície de saída da ferramenta. A Figura (33) demonstra como foi posicionada a câmera térmica para medição das temperaturas.



Figura 33. Posicionamento da Câmera Térmica no torno (Fonte: Autores, 2017).

Inicialmente, retirou-se duas amostras de 150 mm do aço SAE 1045 (Fig.34) através da Serra de Fita - Máquina Gravitacional e Manual S3420NG - Starrett. Em seguida, para que a peça ficasse plana, faceou-se as suas extremidades. Para reduzir ao máximo o balanço da peça enquanto é realizado o ensaio, fez-se o furo de centro para fixar a contra ponta do torno.



Figura 34. Retirada da amostra do tarugo do aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017).

Usinou-se 1 mm de diâmetro através do torneamento cilíndrico externo afim de remover possíveis ressaltos do material fundido. Em seguida, com a utilização da ferramenta Bedame N151 2-300, fez-se canais de 3mm de largura e 7mm de profundidade ao longo do comprimento do material afim de dividir as seções de usinagem. Cada seção possuía 20 mm de comprimento.

Para que as condições iniciais de temperatura permaneçam, os canais de 3 mm serviram para pausar o avanço até que a temperatura inicial restabeleça. Vários avanços foram testados, sendo



o valor de 0,65 mm/rot, acima do permitido pelo fabricante que é de 0,5 mm/rot, o de melhor resultado, uma vez que garantiu a quebra do cavaco conforme o desejado, assegurando o perfeito funcionamento da câmara térmica sem danificá-la.

Para cada tipo de refrigeração foram utilizadas dez condições de corte diferentes e para cada condição serão realizadas três repetições. A Tabela (6) mostra as condições de corte utilizadas nos ensaios de temperatura.

Tabela 6. Condições de corte utilizadas nos ensaios de medição de temperatura (Fonte: Autores, 2017).

Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)	Diâmetro de usinagem (mm)	Velocidade de corte (m/min)	Temperatura inicial da ferramenta (°C)
630	0,65	50	99	32
630	0,65	49	97	32
630	0,65	48	95	32
630	0,65	47	93	32
630	0,65	46	91	32
630	0,65	45	89	32
630	0,65	44	87	32
630	0,65	43	85	32
630	0,65	42	83	32
630	0,65	41	81	32
630	0,65	40	79	32

A geometria da ferramenta de corte utilizada, tais como espessura (LE), comprimento efetivo da aresta de corte (S), raio de canto (RE) e diâmetro do círculo inscrito (IC), estão representadas na Fig. (35). A Tabela (7) indica as dimensões da ferramenta de corte utilizada (Sandvik TPMR 09 02 04 4225).

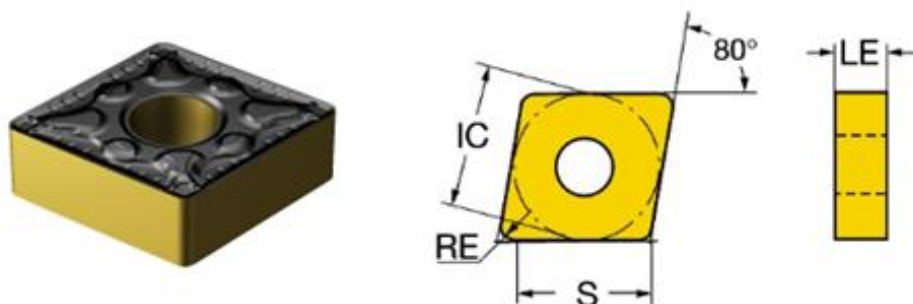


Figura 35. Geometria da ferramenta de corte (Fonte: Sandvik, 2012).

Tabela 7. Dimensões da ferramenta de corte (Fonte: Sandvik, 2012).

Comprimento efetivo da aresta de corte - S (mm)	Espessura da pastilha - LE (mm)	Raio de canto RE (mm)	Diâmetro do círculo inscrito - IC (mm)
12,096	4,763	0,794	12,7

As Figuras (36), (37) e (38) ilustram o ensaio de torneamento nas três condições propostas. Para o torneamento com refrigeração por fluido emulsionável utilizou-se um ângulo de incidência de 74 graus com relação ao plano de face da peça e uma distancia de 15 mm da ferramenta. Já com a utilização do tubo vórtices utilizou-se um ângulo de incidência de 43 graus com relação ao plano de face da peça e uma distancia de 13 mm da ferramenta de corte.

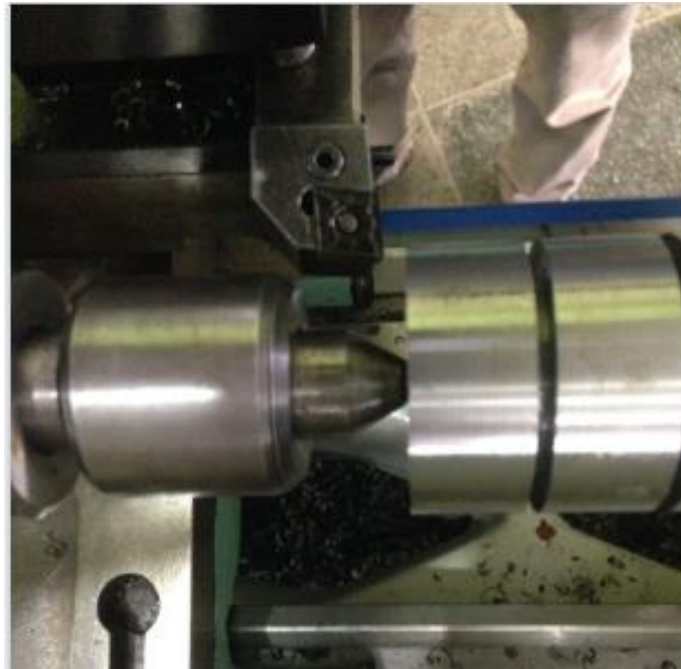


Figura 36. Torneamento cilíndrico externo a seco do aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017).



Figura 37. Torneamento cilíndrico externo com jorro aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017).



Figura 38. Torneamento cilíndrico externo com tubo vórtices aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017).

### 3.2.3. Faceamento rápido no torneamento do aço SAE 1045 - Ensaio Definitivo

Este ensaio é semelhante ao realizado no pré-teste, o único ponto que divergiu do procedimento anterior foi a afiação da ferramenta. Visando buscar a padronização dos ensaios, contratou-se a empresa AFiatec para afiação dos bits, Fig. (39) e (40). A Tabela (8) indica as condições de corte utilizadas e os ângulos de afiação da ferramenta de aço-rápido determinados para o aço SAE 1045.

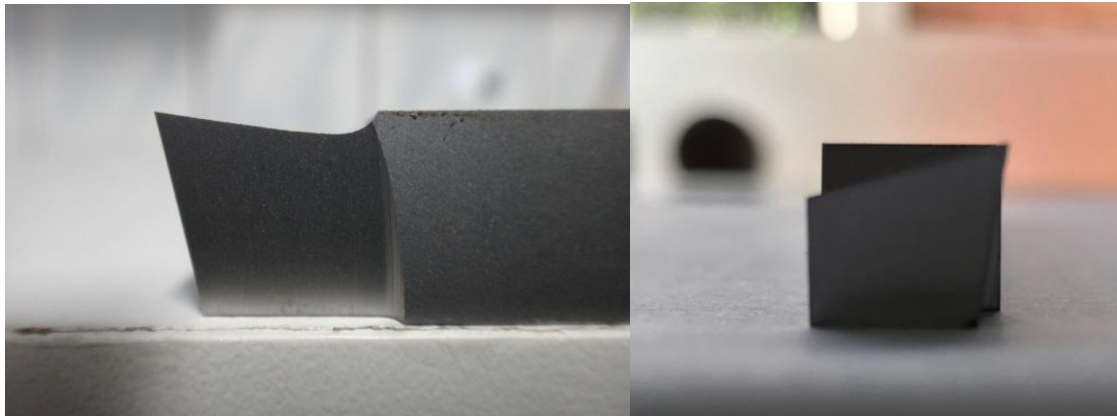


Figura 39. Vista frontal e lateral dos bits afiados (Fonte: Autores, 2017).



Figura 40. Ferramentas afiadas pela empresa AFiatec (Fonte: Autores, 2017).

Tabela 8. Condições de corte e geometria da ferramenta no faceamento rápido do Aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017).

<b>Ensaio de Faceamento Rápido do Aço SAE 1045</b>	
Rotação - $n$ (rpm)	400
Avanço - $f$ (mm/rot)	0,167
Profundidade de corte - $a_p$ (mm)	0,5
Ângulo de saída - $\gamma_o$ (graus)	10
Ângulo de folga - $\alpha_o$ (graus)	8
Ângulo de posição - $\chi_r$ (graus)	75

### 3.2.4. Medição de temperatura com câmera termográfica no torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045 - Ensaio Definitivo

Neste ensaio o objetivo foi medir a temperatura da aresta de corte da ferramenta, através de duas velocidades de corte, a fim de comparar tais temperaturas com os diferentes tipos de refrigeração aplicados, condição lubri-refrigerante - com aplicação de fluido de corte em abundância (jorro) - e também a seco, no torneamento cilíndrico externo. Todos os parâmetros utilizados foram semelhantes ao utilizados no pré-teste.

Para cada tipo de refrigeração utilizou-se duas condições de corte diferentes e para cada condição foram realizadas três repetições. A Tabela (9) indica as condições de corte que para este ensaio.

Tabela 9. Condições de corte utilizadas nos ensaios de medição de temperatura (Fonte: Autores, 2017).

<b>Torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045</b>		
Rotação - $n$ (rpm)	500	315
Avanço - $f$ (mm/rot)	0,65	0,65
Diâmetro de usinagem - $D$ (mm)	48	49
Velocidade de corte - $V_c$ (m/min)	75	46
Temperatura inicial da ferramenta - $T_i$ (°C)	32	32

### 3.2.5. Medição de temperatura com câmera termográfica no torneamento cilíndrico externo do Ferro Fundido Cinzento FC250 - Ensaio Definitivo

Ao analisar o resultado do ensaio anterior para o aço SAE 1045, foi necessário alterar o material para realização deste ensaio, com o intuito de obter velocidades de corte superiores à dos pré-testes e realizar melhor fragmentação do cavaco, uma vez que o ferro fundido cinzento FC250 forma cavacos em lascas. Este ensaio foi semelhante ao realizado inicialmente, porém neste serão utilizados insertos de metal duro da classe K revestidos de  $TiN+Al_2O_3$ , um tarugo de ferro fundido com diâmetro de 40 mm e comprimento de 500 mm e outros parâmetros de corte.

Inicialmente, retiraram-se duas amostras de 150 mm de ferro fundido do tarugo, ilustrado na Fig. (41), através da Serra de Fita - Máquina Gravitacional e Manual S3420NG - Starrett. Em seguida, para que a peça ficasse plana dos dois lados, faceou-se as suas extremidades. Para reduzir ao máximo o balanço da peça enquanto é realizado o ensaio, fez-se o furo de centro para fixar a contra ponta do torno.



Figura 41. Corte da amostra do tarugo de ferro fundido para ensaio (Fonte: Autores, 2017).

Usinou-se 1 mm de diâmetro através do torneamento cilíndrico externo afim de remover possíveis ressaltos do material fundido. Em seguida, com a utilização da ferramenta Bedame N151 2-300, fez-se canais de 3mm de largura e 7mm de profundidade ao longo do comprimento do material afim de dividir em seções de usinagem. Cada seção possuía 20mm de comprimento. A Figura (42) ilustra a preparação do corpo de prova a ser ensaiado, bem como uma amostra pronta do mesmo. A Tabela (10) indica as condições de corte que foram utilizadas nestes ensaios

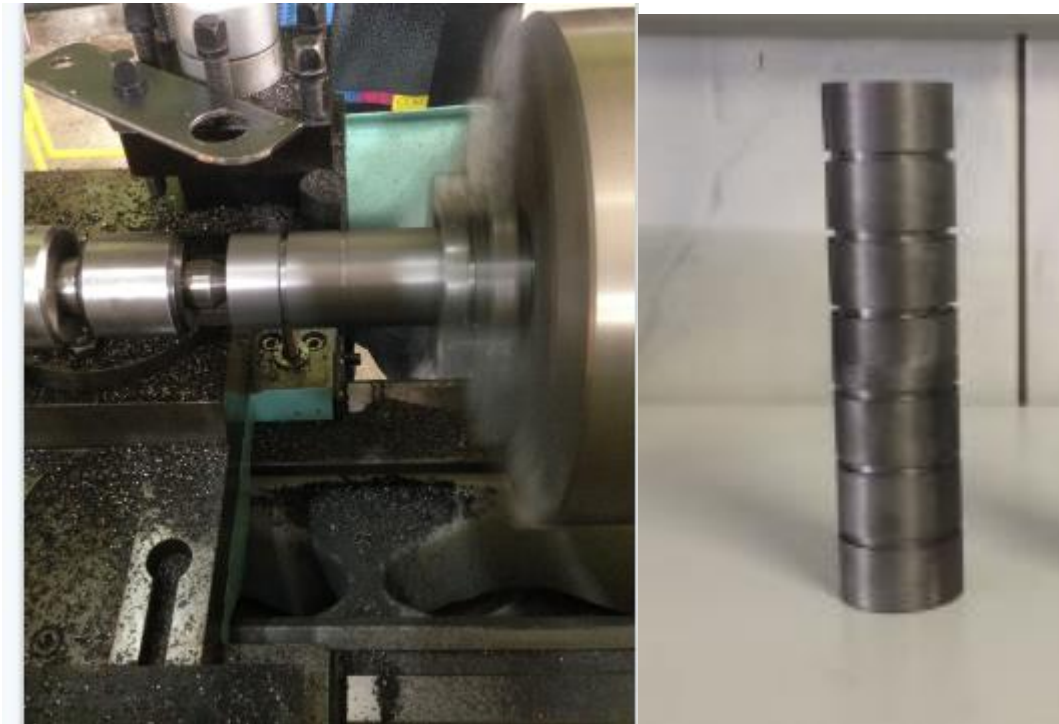


Figura 42. Preparação do corpo de prova de ferro fundido (Fonte: Autores, 2017).

Tabela 10. Condições de corte utilizadas nos ensaios de medição de temperatura no torneamento cilíndrico externo do ferro fundido cinzento FC250 (Fonte: Autores, 2017).

<b>n (rpm)</b>	<b>D (mm)</b>	<b>Vc (m/min)</b>	<b>f (mm/rot)</b>	<b>T inicial da ferramenta (°C)</b>
2500	38	298	0,2	32
1250	37	145	0,2	32
630	36	71	0,2	32

A ferramenta utilizada foi semelhante à do pré-teste. As Figuras (43), (44) e (45) ilustra o ensaio de torneamento nas três condições propostas. Para o torneamento com refrigeração por fluido emulsionável e com tubo vórtices utilizaram-se um ângulo de incidência de 43 graus com relação ao plano de face da peça e uma distancia de 15 mm da ferramenta.



Figura 43. Torneamento cilíndrico externo a seco ferro fundido (Fonte: Autores, 2017).



Figura 44. Torneamento cilíndrico externo com fluido ferro fundido (Fonte: Autores, 2017).





Figura 45. Torneamento cilíndrico externo com tubo vórtices ferro fundido (Fonte: Autores, 2017).

### **3.2.6. Caracterização do Ferro Fundido Cinzento FC250**

Nesta etapa realizou-se a caracterização microestrutural do ferro fundido cinzento FC250 de acordo com as metodologias descritas a seguir.

#### **3.2.6.1. Ensaio Metalográfico do Ferro Fundido Cinzento FC250**

O objetivo desta etapa foi caracterizar a microestrutura do ferro fundido por meio de ensaio metalográfico, para realmente comprovar o material em questão. Efetuou-se a caracterização microestrutural em uma amostra retirada do corpo de prova utilizado no ensaio de medição de temperatura. A preparação da amostra, para análise metalográfica, consistiu no lixamento com lixas na sequência de *mesh* 100, 240, 320, 400, 600, 800 e 1200, e polimento com pasta de diamante de granulometria 0,25  $\mu\text{m}$ . Posteriormente atacou-se a amostra com Nital a 2% com o intuito de revelar a microestrutura do material. O lixamento da amostra, polimento, ataque químico com Nital e a análise metalográfica foram realizados no Laboratório de Materiais da UnB-FGA. Os ensaios foram regidos pela norma ABNT NBR 15454:2007.

Para esta etapa dispôs-se de amostras de ferro fundido cinzento, o material foi usinado a partir de um tarugo de 40 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento. Para que o material pudesse ser manuseado na etapa de lixamento para o ensaio de metalografia se fez necessária uma peça de 35 mm de diâmetro. Para melhor manuseio optou-se por um comprimento de 15 mm.

A fim de obter uma peça de 15 mm de comprimento cortou-se a peça de ferro fundido em 17 mm de comprimento através da Serra de Fita - Máquina Gravitacional e Manual S3420NG – Starret.

Usinou-se a peça de 17 mm de comprimento para que sua superfície fique plana, retirou-se então 1 mm de cada lado da peça através do torneamento de faceamento rápido com rotação de 630 rpm e avanço de 0,163 m/min, com a ferramenta de metal duro do tipo k. Para obtenção da peça final usinou-se, no torneamento cilíndrico externo, a fim de deixar a peça com diâmetro final de 35 mm, para isso a remoção de material foi de 0,5 mm por usinagem até chegar no diâmetro desejado, utilizou-se um paquímetro analógico para auxílio na medição da peça, utilizou-se a rotação de 630 rpm e avanço de 0,163 m/min.

A Figura (46) ilustra tal corpo de prova preparado para o ensaio de metalografia.



Figura 46. Corpo de prova para ensaio de metalografia (Fonte: Autores, 2017).

O ensaio de metalografia exige o processo de lixamento e polimento para obtenção de imagens microscópicas do material desejado. Nesta etapa utilizou-se lixas d'Água com diferentes tamanhos de grãos, iniciando pela lixa d'Água 225x275mm grão 100 – Norton, na sequência com as mesmas especificações as lixas de grão 240, 320, 400, 600, 800 e 1200 foram utilizadas até que por fim poliu-se a superfície da amostra com pano para polimento com tecido de poliéster Arotec com o auxílio da pasta de diamante de granulometria 0,25  $\mu\text{m}$ . Para que as lixas fossem fixadas na superfície de lixamento da Politriz polipan-2D, cortou-se a lixa com auxílio da própria forma do suporte da lixa.

A Figura (47) ilustra o processo de lixamento da superfície da peça com a utilização da Politriz polipan-2D com rotação de 300 rpm e vazão de água na lixa de 0,14 L/min. A forma de posicionamento e suporte da peça na lixa é dado pela Fig. (42), esforços tangenciais e verticais foram evitados pelo operador.



Figura 47. Procedimento de lixamento superficial da peça (Fonte: Autores, 2017).

Realizou-se o processo de lixamento da superfície da amostra em apenas um sentido por etapa de lixa utilizada, conforme ocorre troca de lixa para grãos menores, girou-se a peça 90° garantindo assim melhor acabamento superficial. A Figura (48) ilustra a evolução da superfície do material após o lixamento com lixas d'Água 225x275mm grão 100, 240 e 320.



Figura 48. Evolução da superfície do material após o lixamento com lixas de *mesh* 100, 240 e 320 (Fonte: Autores, 2017).

A Figura (49) ilustra a evolução da superfície do material após o lixamento com lixas d'Água 225x275mm grão 400, 600, 800 e 1200.



Figura 49. Evolução da superfície do material após o lixamento com lixas de *mesh* 400, 600, 800 e 1200 (Fonte: Autores, 2017).

A Figura (50) ilustra a superfície da amostra após o polimento com pano para polimento e Pasta de diamante de granulometria 0,25  $\mu\text{m}$ .

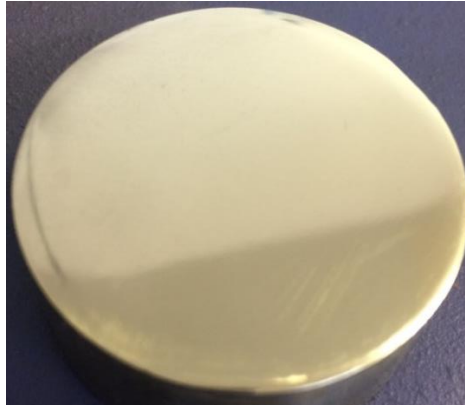


Figura 50. Superfície da amostra após polimento (Fonte: Autores, 2017).

Para que houvesse obtenção das imagens metalográficas no microscópio ótico FM-700 Pantec utilizou-se ataque químico com nital na superfície da peça. Após o polimento superficial da amostra, dispôs-se de 100 mL de nital (2%) em um recipiente onde a amostra pôde ser mergulhada, após este ataque, mergulhou-se em um recipiente contendo água para posteriormente efetuar a obtenção de imagens por microscópio. Posicionou-se a superfície da amostra próxima à lente de obtenção de imagem do microscópio e adquiriu-se a imagem desejada. A Figura (51) ilustra a microestrutura da amostra após todo processo de polimento e ataque químico.

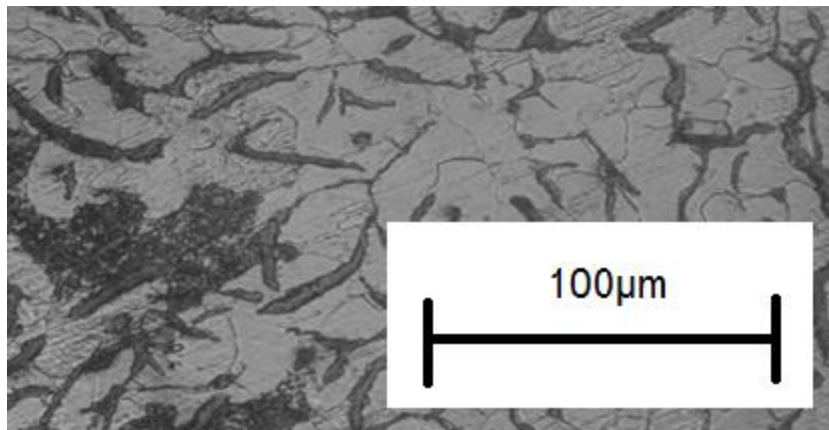


Figura 51. Microestrutura da amostra de ferro fundido cinzento FC250, ampliação de x50 e nital a 2% (Fonte: Autores, 2017).

Através da fig. (51) podemos observar a microestrutura do Ferro Fundido Cinzento FC250, mostrando nas regiões escura os veios de grafita e região clara caracterizando a ferrita verificando assim a caracterização do material utilizado neste trabalho.

### **3.2.7. Caracterização do Aço SAE 1045**

Nesta etapa foi realizada a caracterização microestrutural do ferro fundido de acordo com as metodologias descritas a seguir.

#### **3.2.7.1. Ensaio Metalográfico do Aço SAE 1045**

O objetivo desta etapa foi caracterizar a microestrutura do Aço SAE 1045 por meio de ensaio metalográfico, para realmente comprovar o material em questão. Efetuou-se a caracterização microestrutural em uma amostra retirada do corpo de prova utilizado no ensaio de medição de temperatura e faceamento rápido. A preparação da amostra, para análise metalográfica, consistiu-se no lixamento com lixas na sequência de *mesh* 100, 240, 320, 400, 600, 800 e 1200, e polimento com pasta de diamante de granulometria 0,25 µm. Posteriormente atacou-se a amostra com Nital a 2% com o intuito de revelar a microestrutura do material. O lixamento, polimento, ataque químico com Nital e a análise metalográfica foram realizados no Laboratório de Materiais da UnB-FGA. Os ensaios são regidos pela norma ABNT NBR 15454:2007.

Para esta etapa dispôs-se de amostras de Aço SAE 1045, o material foi usinado a partir de um tarugo de 50,8 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento. Para que o material possa ser manuseado na etapa de lixamento para o ensaio de metalografia é necessária uma peça de 35 mm de diâmetro. Para melhor manuseio optou-se por um comprimento de 25 mm.

A fim de obter uma peça de 25 mm de comprimento cortou-se o material de ferro fundido em 27 mm de comprimento através da Serra de Fita - Máquina Gravitacional e Manual S3420NG – Starret.

Usinou-se a peça de 27 mm de comprimento para que sua superfície fique plana, retirou-se então 1 mm de cada lado da peça através do torneamento de faceamento rápido com rotação de 630 rpm e avanço de 0,163 m/min, com a ferramenta de metal duro do tipo k. Para obtenção da peça final usinou-se no torneamento cilíndrico externo a fim de deixar a peça com diâmetro final de 35 mm, para isso a remoção de material foi de 0,5 mm por usinagem até chegar no diâmetro desejado, utilizou-se um paquímetro analógico para auxílio na medição da peça, utilizou-se a rotação de 630 rpm e avanço de 0,163 m/min.

A Figura (52) ilustra tal corpo de prova preparado para o ensaio de metalografia.



Figura 52. Corpo de prova para ensaio de metalografia do aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017).

O ensaio de metalografia exige o processo de lixamento e polimento para obtenção de imagens microscópicas do material desejado. Nesta etapa utilizou-se lixas d'Água com diferentes tamanhos de grãos, iniciando pela lixa d'Água 225x275mm grão 100 – Norton, na sequência com as mesmas especificações as lixas de grão 240, 320, 400, 600, 800 e 1200 foram utilizadas até que por fim poliu-se a superfície da amostra com pano para polimento com tecido de poliéster Arotec com o auxílio da pasta de diamante de granulometria 0,25  $\mu\text{m}$ . Para que as lixas sejam fixadas na superfície de lixamento da Politriz polipan-2D, cortou-se a lixa com auxílio da própria forma do suporte da lixa.

A Figura 53 ilustra o processo de lixamento da superfície da peça com a utilização da Politriz polipan-2D com rotação de 300 rpm e vazão de água na lixa de 0,14 L/min. A forma de posicionamento e suporte da peça na lixa é dado pela Fig. (53), esforços tangenciais e verticais foram evitados pelo operador.

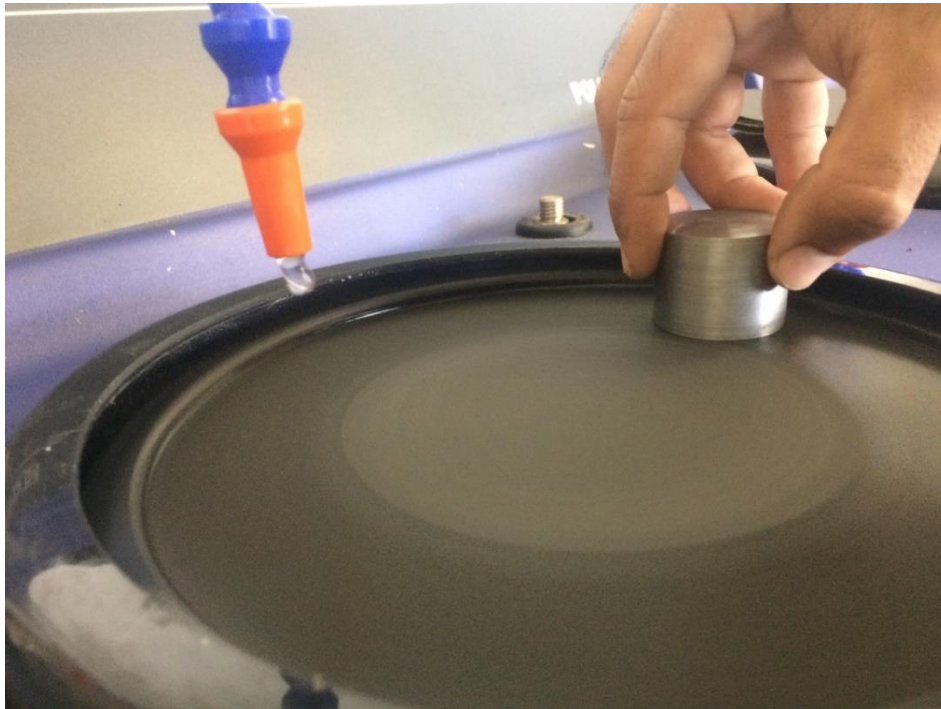


Figura 53. Procedimento de lixamento superficial da peça (Fonte: Autores, 2017).

Realizou-se o processo de lixamento da superfície da amostra em apenas um sentido por etapa de lixa utilizada, conforme ocorre troca de lixa para grãos menores, girou-se a peça 90° garantindo assim melhor acabamento superficial. A Figura (54) ilustra a evolução da superfície do material após o lixamento com lixas d'Água 225x275mm grão 100, 240 e 320.



Figura 54. Evolução da superfície do material após o lixamento com lixas de *mesh* 100, 240 e 320 (Fonte: Autores, 2017).

A Figura (55) ilustra a evolução da superfície do material após o lixamento com lixas d'Água 225x275mm grão 400, 600, 800 e 1200.



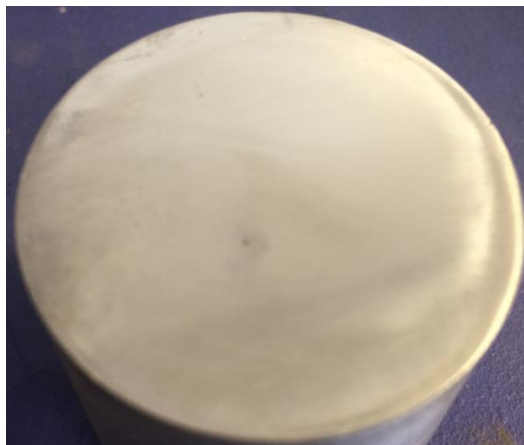


Figura 55. Evolução da superfície do material após o lixamento com lixas de *mesh* 400, 600 e 1200 (Fonte: Autores, 2017).

A Figura (56) ilustra a superfície da amostra após o polimento com pano para polimento e pasta de diamante de granulometria 0,25  $\mu\text{m}$ .

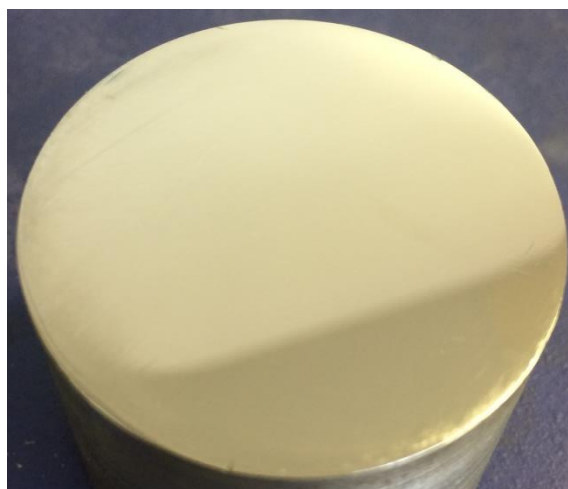


Figura 56. Superfície da amostra após polimento (Fonte: Autores, 2017).

Para que houvesse obtenção das imagens metalográficas no microscópio ótico FM-700 Pantec utilizou-se ataque químico com nital na superfície da peça. Após o polimento superficial da amostra, dispôs-se de 100 mL de nital (2%) em um recipiente onde a amostra pôde ser mergulhada, após este ataque, mergulhou-se em um recipiente contendo água para posteriormente efetuar a obtenção de imagens por microscópio. Posicionou-se a superfície da amostra próxima à lente de obtenção de imagem do microscópio e adquiriu-se a imagem desejada. A Figura (57) ilustra a microestrutura da amostra após todo processo de polimento e ataque químico.

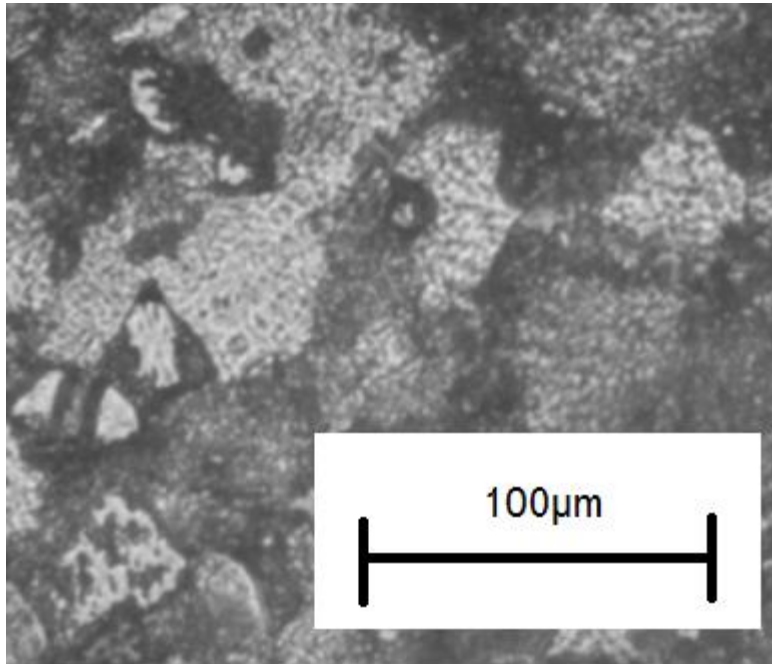


Figura 57. Microestrutura da amostra de Aço SAE 1045, ampliação de x50 e nital a 2% (Fonte: Autores, 2017).

Através da fig. (57) podemos observar a microestrutura do Aço SAE 1045, mostrando nas regiões escura a perlita e a região clara caracterizando a ferrita verificando assim a caracterização do material utilizado neste trabalho.

### 3.2.8. Análise de Custos

Nesta análise o propósito foi comparar financeiramente os sistemas de refrigeração utilizados, tubo vórtices e jorro. Equipamentos como compressor e motor da bomba do torno, integram o maquinário de um laboratório, portanto não se faz necessário adicioná-los aos custos, somente o seu consumo energético.

No experimento realizado, o volume da solução de fluido que se adicionou ao reservatório do torno foi de 8 litros, sendo necessário a utilização de 416 mL de fluido de corte para obter uma concentração de 5,2% na escala Brix.

Em relação à reposição do mesmo fluido, observou-se as informações mencionadas por Ferraresi (1977). O autor verificou que as propriedades das soluções de corte se mantêm eficientes no período de uma semana até seis meses. Admitiu-se no trabalho que a troca do fluido de corte deve ocorrer no período de uma semana, garantindo assim a perfeita concentração da solução.

Para análise da periodicidade de trocas das ferramentas, relacionou-se os dados obtidos no ensaio definitivo do faceamento rápido do aço SAE 1045 com o tempo estimado para reposição destas, pois este implica na medição de sua vida útil.

Com a aplicação do tubo vórtices, acarretou um aumento de 0,44% na vida útil da ferramenta, se comparado ao jorro. Feita estas análises de porcentagens no tempo, verificou-se que a ferramenta, com a utilização de fluido de corte, terá que ser substituída 0,44% antes, ao se comparar esse período com o do tubo vórtices.

Esse tempo estimado, depende também de outros fatores como: material a ser usinado, condições de corte e calibração da máquina. No ensaio realizado, não foi possível obter este resultado. Logo, foi fixado, apenas como um referencial, o tempo de 5 horas de usinagem para o tubo vórtices. Supõem-se também, que foram realizadas 25 horas de usinagem em uma semana.

Os parâmetros relevantes para esta análise foram inseridos na Tab. (15).

Tabela 11. Parâmetros para análise de custos (Fonte: Autores, 2017).

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência do Motor do Compressor Schulz 175 lbf/pol <sup>2</sup> (kW)	3,7
Potência do Motor da Bomba do Torno Convencional modelo Mascote MS-205 - Nardini (kW)	0,09
Preço do kWh (R\$)	0,5653744
Preço da uma pastilha de corte de Metal Duro Classe K (R\$)	95,80
Tempo estimado de reposição da ferramenta de corte utilizando o tubo Vórtices (horas)	5
Tempo de usinagem realizados por semana (horas)	25
Preço do litro do fluido de corte (R\$)	38,00
Tempo estimado de reposição da solução de fluido de corte (semanas)	1
Tubo Vórtices desenvolvido pelo Senai - Ítalo Bologna de Goiânia-GO (R\$)	2285,00

## 4. RESULTADOS

### 4.1. MEDIÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO DISPOSITIVO

Nas análises iniciais, variou-se a pressão três vezes (4, 6 e 8 bar) e a válvula de regulação foi modificada em duas configurações, aberta e fechada. Na Tabela (11), foram indicados os valores obtidos através do *software SmartView*, sendo que TQ e TF significam temperatura quente e fria, respectivamente.

Tabela 12. Relação entre temperaturas, pressão e abertura de válvula (Fonte: Autores, 2017).

Pressão (bar)	Saídas de ar	Válvula aberta (°C)	Válvula fechada (°C)
4	Quente	34,2	42,8
	Frio	4,2	5,5
6	Quente	36,5	44,2
	Frio	0,2	2,5
8	Quente	38,8	44,7
	Frio	-7,8	2,3

Através da Tab. (11) pode-se observar que ao abrir a válvula de regulação, obtém-se menores temperaturas na extremidade fria. As temperaturas na saída de ar frio e na saída de ar quente variam de acordo com a pressão de entrada do tubo vórtices, como também com a variação da abertura da válvula de saída de ar quente.

No gráfico da Fig. (58) é possível observar a relação das temperaturas com a pressão injetada. Os valores obtidos relacionaram-se com a pressão de 8 bar, como pode ser observada na figura abaixo, onde TQA, TFA, TQF e TFF indicam a temperatura na saída de ar quente com a válvula aberta, temperatura na saída de ar frio com a válvula aberta, temperatura na saída de ar quente com a válvula fechada e temperatura na saída de ar frio com a válvula fechada, respectivamente.

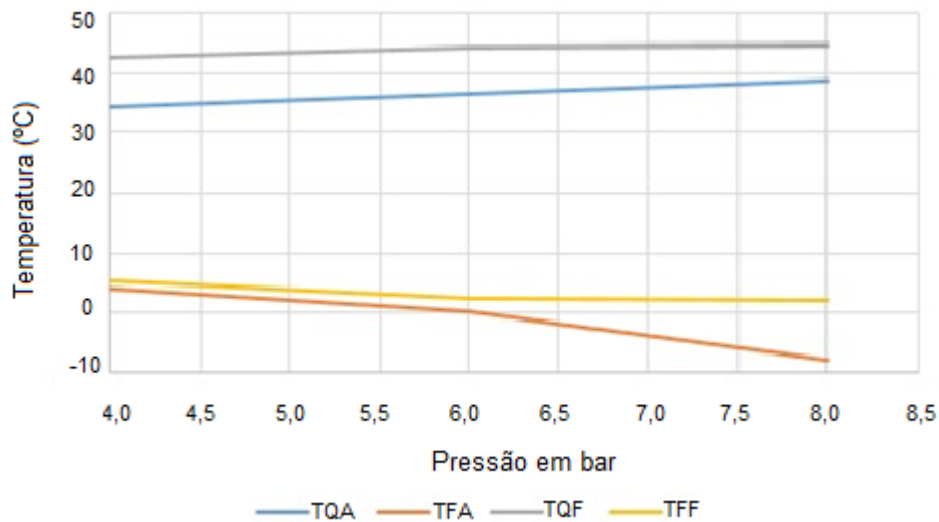


Figura 58. Relação entre temperatura e pressão (Fonte: Autores, 2017).

A Figura (59-a) indica o maior valor de temperatura obtido nos experimentos, na saída de ar quente. Com auxílio do *software* uma linha foi inserida na imagem com o intuito de obter o gradiente de temperatura. Na Figura (59-b) obteve-se o gráfico de variação da temperatura.

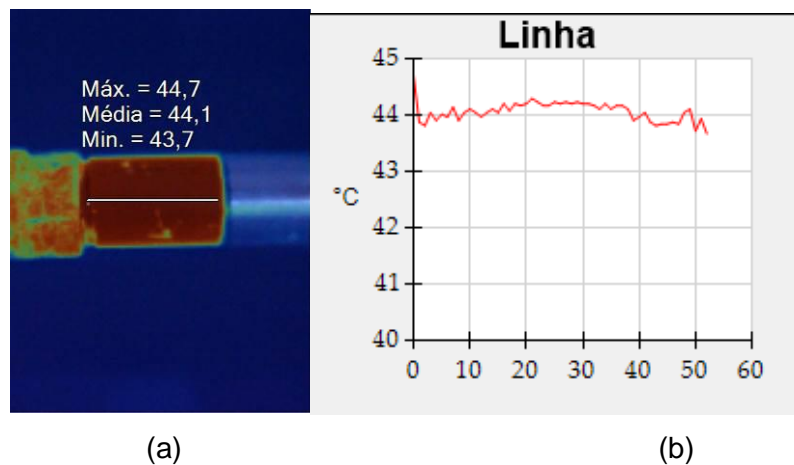


Figura 59. Gradiente de temperatura na saída de ar quente (Fonte: Autores, 2017).

O fluido que foi inserido no processo de torneamento está relacionado com a temperatura na saída fria do dispositivo. Na Figura (60-a) ilustra os menores valores de temperatura no duto frio, e na Fig. (60-b) tem-se o gráfico da variação de temperatura no duto.

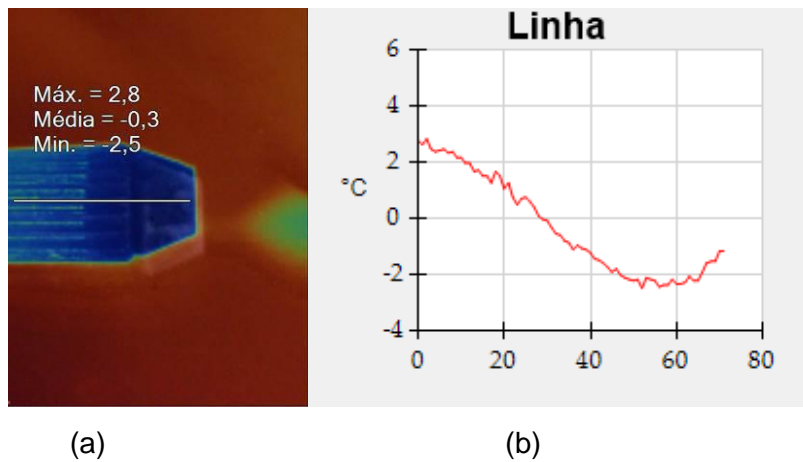


Figura 60. Gradiente de temperatura na saída de ar frio (Fonte: Autores, 2017).

De posse da menor temperatura no duto, tirou-se uma foto frontal do bico de saída fria para uma melhor análise, observou-se uma queda de temperatura, podendo ser vista na Fig. (61-a), também foi plotado o gráfico da variação de temperatura na Fig. (61-b).

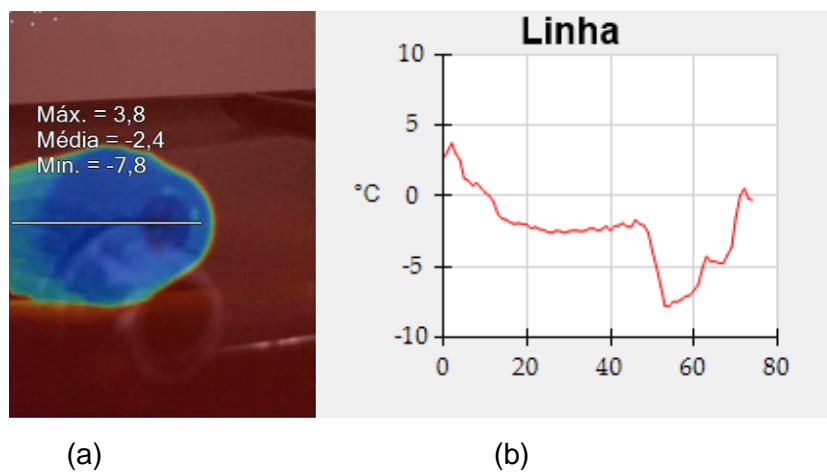


Figura 61. Gradiente de temperatura da vista frontal da saída de ar frio (Fonte: Autores, 2017).

## 4.2. PRÉ-TESTES

### 4.2.1. Faceamento rápido no torneamento do aço SAE 1045

A Figura (62) mostra os resultados obtidos no ensaio de faceamento rápido para as mesmas condições de corte, alterou-se apenas o modo de refrigeração da ferramenta de corte. Para os

ensaios realizados obtiveram-se os valores de 91,07 +/- 3,85 mm, 106,38 +/- 1,04 mm e 122,15 +/- 2,37 mm para o a seco, jorro de fluido e com a utilização do tubo vórtices, respectivamente.

Observou-se que com a aplicação do fluido emulsionável, a ferramenta entra em colapso com um diâmetro maior do que quando não se aplica nenhuma refrigeração, ocasionando um aumento de 16,81% na sua vida útil, que pode ser justificado pelo seu poder refrigerante, estendendo a dureza a quente da ferramenta durante o torneamento, e conseqüentemente, retardando a sua deformação plástica.

Já ao se utilizar o tubo vórtices, o ar frio foi direcionado para ponta da ferramenta de corte, cujo objetivo era diminuir a temperatura na zona de corte. O comprimento usinado foi de 14,82 % maior em relação ao jorro de fluido emulsionável.

A utilização do ar refrigerado, retardou o colapso da aresta de corte, ocasionando em resultados foram satisfatórios, mostrando-se viável a utilização de ar comprimido no processo de torneamento, para as condições de corte utilizadas.

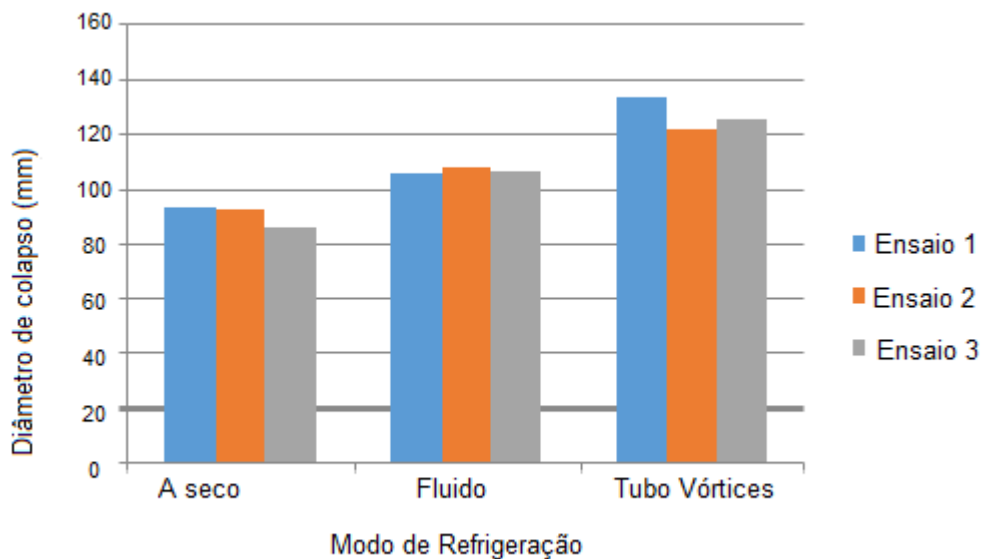


Figura 62. Resultados do faceamento rápido em diferentes condições de refrigeração (Fonte: Autores, 2017).

#### 4.2.2. Medição de temperatura com câmera termográfica no torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045

A Figura (63) ilustra o modo com que foram processados os dados referentes às temperaturas dos ensaios, através do *software*. Fez-se um círculo na ponta da ferramenta, cujo intuito era diminuir a área de captação, objetivando focar na ponta da ferramenta e reduzir a influência das temperaturas dos cavacos. Através deste método foi obtida as maiores temperaturas para cada ensaio, fez-se isto devido à dificuldade de obter um ponto fixo no *software* para capturar a

temperatura no ponto exato e padronizar estes dados. Logo para ter os dados uniformes, adquiriu-se a maior temperatura de cada ensaio, estes valores foram adicionados a Tab. (12).

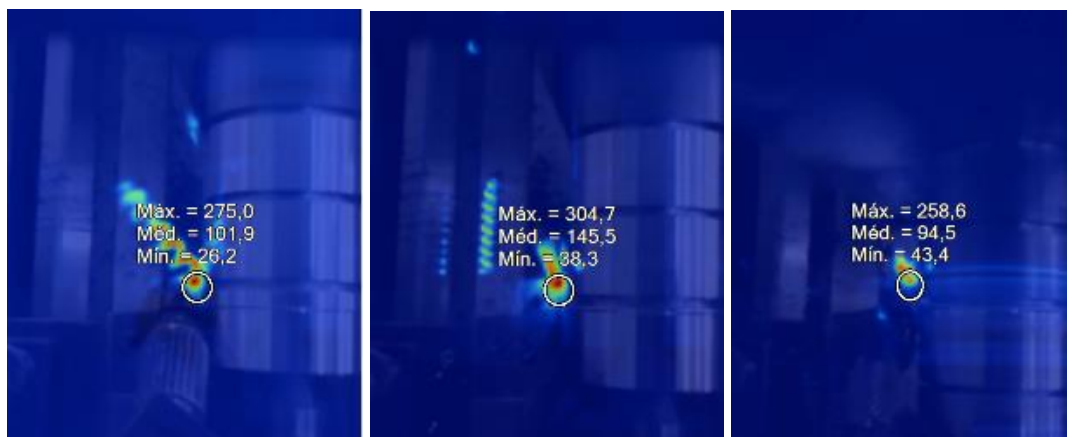


Figura 63. Medições de temperaturas na ponta da ferramenta no torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045 (Fonte: Autores, 2017).

Tabela 13. Temperaturas para diferentes condições de refrigeração e velocidades de corte (Fonte: Autores, 2017).

Velocidade de corte (m/min)	Temperatura para condições de refrigeração (°C)		
	Tubo Vórtices	Fluido	A Seco
99	362,8 +/- 25,6	189,2 +/- 4,7	313,0 +/- 18,7
97	328,3 +/- 8,9	161,8 +/- 36,5	337,7 +/- 12,7
95	303,4 +/- 12,6	254,9 +/- 6,2	353,7 +/- 7,5
93	329,4 +/- 13,0	259,2 +/- 2,8	358,0 +/- 9,0
91	330,6 +/- 18,6	268,6 +/- 2,1	362,3 +/- 10,0
89	311,0 +/- 15,6	268,6 +/- 2,6	347,0 +/- 13,7
87	313,1 +/- 11,2	271,8 +/- 3,3	345,3 +/- 13,2
85	316,1 +/- 9	271,9 +/- 7,8	356,3 +/- 11,5
83	308,1 +/- 8,0	266,8 +/- 11,6	337,3 +/- 14,2
81	317,8 +/- 8,0	271,0 +/- 5,0	344,3 +/- 7,1
79	320,3 +/- 10,7	272,1 +/- 6,1	360,0 +/- 18,1

Através dos dados da tabela acima, plotou-se o gráfico que pode ser visto na Fig. (64). Compreende-se por meio deste que a variação da temperatura é irrisória para velocidades de corte próximas, sendo assim, não é possível realizar uma análise detalhada relacionando a temperatura com a velocidade de corte. O que ocasionou em uma mudança de material para este



ensaio, cujo intuito é obter velocidades de corte superiores as já alcançadas, logo compreender melhor a relação citada acima.

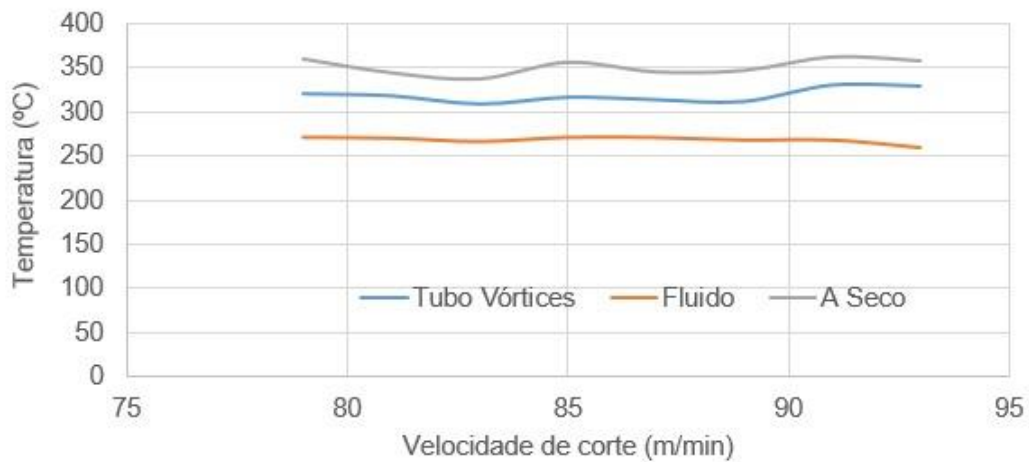


Figura 64. Gráfico temperatura x velocidade de corte para diferentes condições de refrigeração (Fonte: Autores, 2017).

#### 4.3. FACEAMENTO RÁPIDO - MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DE COLAPSO - ENSAIO DEFINITIVO

A Figura (65) demonstra os resultados obtidos no ensaio de faceamento rápido para as mesmas condições de corte, alterando apenas o modo de refrigeração da ferramenta de corte. Para os ensaios realizados obtiveram-se os valores de 127,90 +/- 1,65 mm, 148,77 +/- 24,63 mm e 149,43 +/- 27,23 mm a seco, jorro de fluido e com a utilização do tubo vórtices, respectivamente.

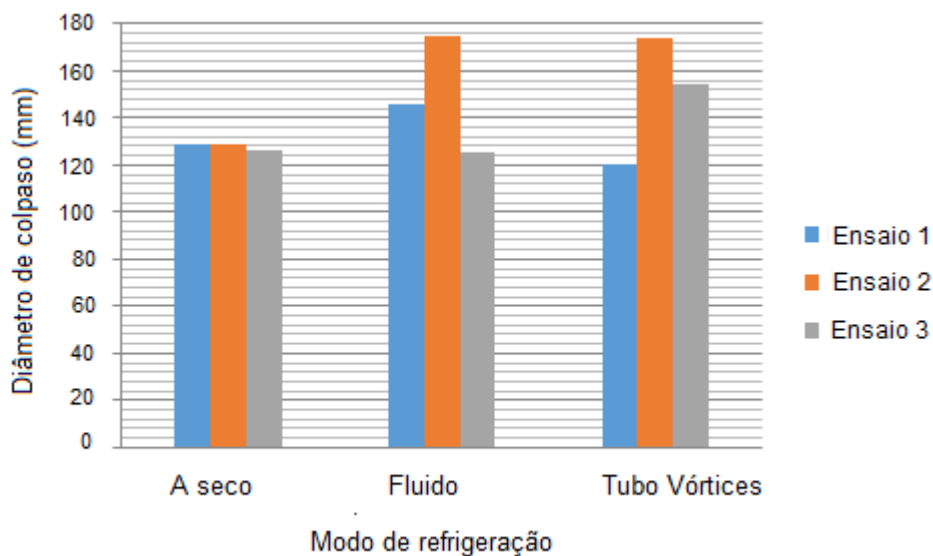


Figura 65. Comparação do diâmetro de colapso da ferramenta no torneamento por faceamento rápido em condições diferentes de refrigeração (Fonte: Autores, 2017).

De acordo com a Fig. (65) com a aplicação do fluido de corte, a ferramenta de aço-rápido entrou em colapso em um diâmetro maior do que na condição a seco, com um aumento de 16,32% na vida útil da ferramenta.

Já ao se utilizar o tubo vórtices, o ar frio foi direcionado para a ponta da ferramenta de corte, com o objetivo de diminuir a temperatura na zona de corte. O comprimento usinado com a utilização do tubo vórtices foi semelhante ao diâmetro de colapso da ferramenta com a utilização do fluido de corte, tendo um ganho de apenas 0,44 % comparado a este. Tais resultados foram satisfatórios, mostrando-se viável a utilização de ar comprimido no processo de usinagem.

O elevado desvio padrão dos resultados dos ensaios com mesmas condições de refrigeração não eram esperados, devido à padronização dos ensaios. As ferramentas foram afiadas em uma empresa especializada, para que houvesse uniformização dos ângulos destas. As condições de corte tais como avanço, rotação, profundidade de corte, ângulo de posição mantiveram-se constantes em nos ensaios. Durante todos os ensaios tentou-se manter o mesmo acabamento da peça antes da execução destes, isso foi realizado faceando-se a peça com mesmas condições de corte em todas as preparações dos ensaios com ferramentas de metal duro. A posição da ferramenta no suporte foi semelhante para todos os ensaios, a fim de padronizar e minimizar o balanço da ferramenta durante a usinagem, eliminando assim vibrações críticas.

O efeito guarda-chuva provocado pelo cavaco, que impede que o fluido refrigerante chegue à zona de corte, pode ter sido um fator relevante para explicar o elevado desvio padrão dos ensaios. Durante a formação do cavaco, este se curva acentuadamente na superfície de saída da ferramenta cobrindo a zona de corte, assim o fluido em jorro ou o ar comprimido chocam-se contra o cavaco e são expulsos, não penetrando efetivamente na zona de corte. Sendo que os elevados desvios padrões dos ensaios foram constatados, essencialmente, nas condições refrigerantes, com jorro de fluido e com tubo vórtices.

#### 4.4. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO DO AÇO SAE 1045 - ENSAIO DEFINITIVO

A medição de temperatura na ferramenta foi semelhante à realizada nos pré-testes. A Tabela (13) indica os resultados referentes a estas temperaturas para as três condições, a seco, jorro de fluido e com a utilização do tubo vórtices.

Tabela 14. Temperaturas para diferentes condições de refrigeração e velocidades de corte  
(Fonte: Autores, 2017).

Velocidade de corte (m/min)	Temperatura para condições de refrigeração (°C)		
	Tubo Vórtices	Fluido	A Seco
97	268,6+/-3,6	267,2+/-4,8	297,8 +/- 1,1
46,5	267,4 +/- 7,5	269,7 +/- 7,3	304,3 +/- 7,1

A Figura (66) demonstra graficamente os resultados obtidos no ensaio de medição de temperatura no torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045 para as mesmas condições de corte, alterando o tipo de refrigeração da ferramenta de corte e a velocidade de corte.

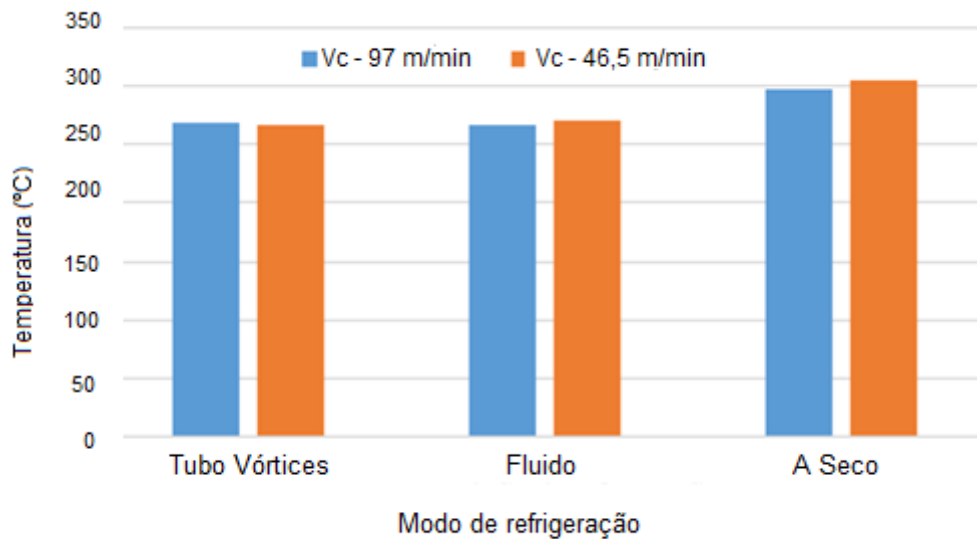


Figura 66. Resultados do torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1045 em diferentes condições de refrigeração (Fonte: Autores, 2017).

Verifica-se que para velocidades próximas a variação de temperatura é irrelevante. Porém, ao se comparar o torneamento a seco e com a utilização de fluido de corte, a temperatura reduz em aproximadamente 12 %. Nota-se para velocidades de corte baixas o tubo vórtices tende a igualar ao fluido de corte em relação à temperatura, sendo a variação de 0,002 % entre eles. Sendo assim, a utilização do tubo vórtices mostra-se viável para velocidade de corte baixa.

#### 4.5. MEDIÇÃO DA TEMPERATURA NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO FC250 - ENSAIO DEFINITIVO

A Figura (67) ilustra o modo com que foram processados os dados referentes às temperaturas dos ensaios de torneamento cilíndrico externo do ferro fundido cinzento FC250. A padronização inferida anteriormente foi realizada para medição das temperaturas.

O ferro fundido cinzento FC250 possui a característica na usinagem de gerar cavacos descontínuos, em lascas, isto pode provocar uma maior dispersão da temperatura medida. Assim, a temperatura na ponta da ferramenta tende a ser menor se comparada com outros materiais que tendem a gerar cavacos contínuos.

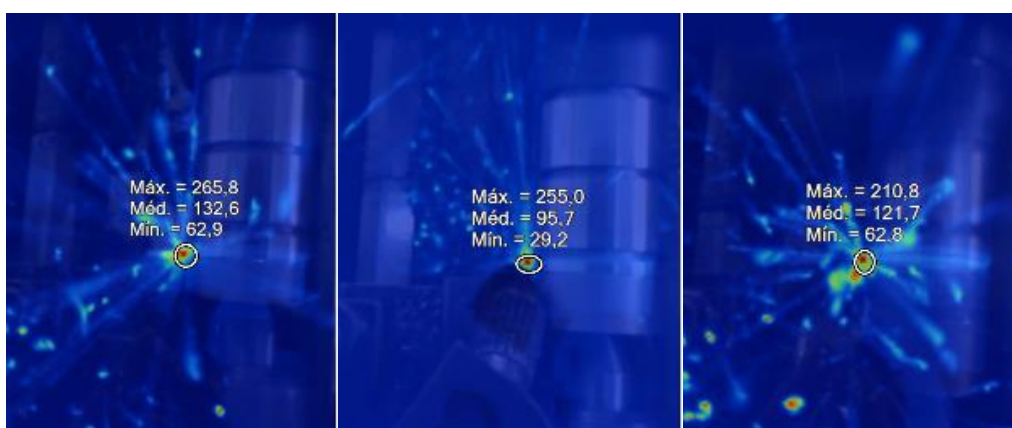


Figura 67. Medições de temperaturas na ponta da ferramenta no torneamento cilíndrico externo do ferro fundido (Fonte: Autores, 2017).

A Tabela (14) indica os resultados referentes a estas temperaturas para as três condições de usinagem testadas, a seco, com jorro de fluido e com a utilização do tubo vórtices. De posse dos dados da tabela, plotou-se o gráfico mostrado na Fig. (68).

Tabela 15. Temperaturas para diferentes condições de refrigeração e velocidades de corte (Fonte: Autores, 2017).

Velocidade de corte (m/min)	Temperatura para condições de refrigeração (°C)		
	Tubo Vórtices	Fluido	A Seco
298	285,7 +/- 7,8	250,5 +/- 11,8	300,3 +/- 6,7
145	248,6 +/- 9,3	222,7 +/- 6,9	282,6 +/- 5,4
71	192,3 +/- 0,4	96,9 +/- 5,4	229,3 +/- 9,9

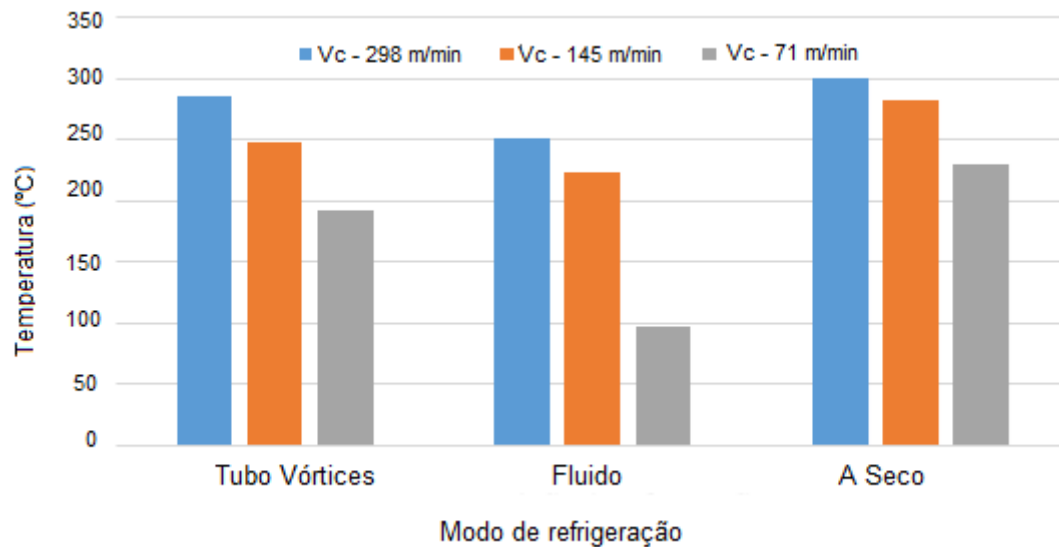


Figura 68. Temperaturas de corte para condições diferentes de refrigeração e velocidades de corte variadas (Fonte: Autores, 2017).

Nota-se que para todos os sistemas, ao aumentar a velocidade de corte ocorre um aumento na temperatura medida, pois o aumento da rotação da máquina, e conseqüentemente, da velocidade de corte, faz com que a peça passe mais vezes pela aresta de corte da ferramenta, aumentando a geração de calor.

Ao se comparar os dados obtidos, observa-se que ao aplicar os métodos de refrigeração, tem-se como mais eficiente, o fluido de corte. A aplicação deste resultou em baixas temperaturas para as três velocidades de corte, ao se comparar com os outros sistemas.

Verifica-se para velocidades mais altas deste ensaio, ao se relacionar o processo a seco e com a utilização de fluido, a temperatura reduz em aproximadamente 16% com a utilização do fluido de corte.

O fluido, além da capacidade de refrigerar a área de corte, pode também agir como um lubrificante na interface cavaco ferramenta, agindo como mais um agente dissipador do calor gerado, o que não ocorre com a utilização do tubo vórtices, este possuindo exclusivamente a função de refrigeração.

#### 4.6. ANÁLISE DE CUSTOS

A Figura (69) ilustra os resultados obtidos na análise de custos para o tubo vórtices e o fluido de corte. Nesta análise não se levou em consideração os custos iniciais de aquisição do fluido de corte e do tubo vórtice. Os custos tendem a serem semelhantes até 20 horas, a partir deste

momento, a utilização do jorro não mais se torna viável economicamente. No período de 100 horas de usinagem, existe uma diferença de 6,10% ao se comparar o uso do fluido de corte.

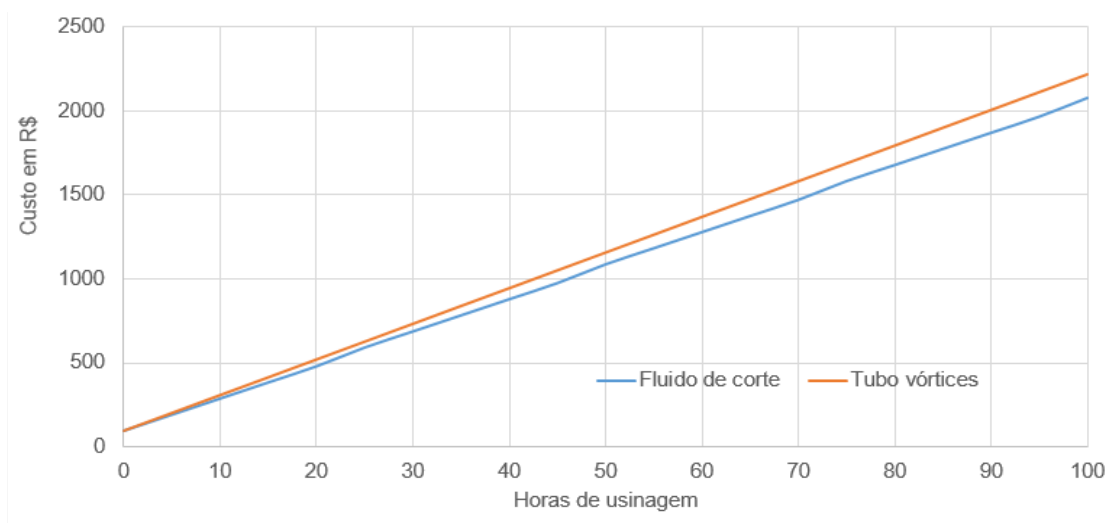


Figura 69. Gráfico de custo por quantidade de horas usinada sem analisar os custos iniciais (Fonte: Autores, 2017).

Já para a Fig. (70) foi levado em consideração os custos iniciais. Pode ser visto que o tubo vórtice possui um alto investimento inicial quando comparado com o óleo de corte, sendo que, a utilização do fluido de corte se torna viável na usinagem. No período de 100 horas de usinagem, existe uma diferença de 115% ao se comparar ao uso do fluido de corte.

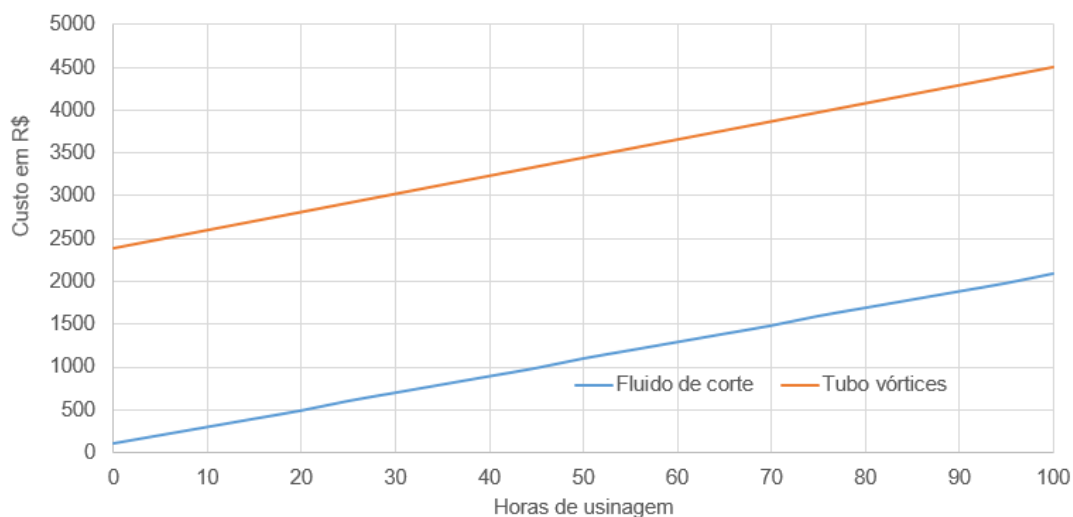


Figura 70. Gráfico de custo por quantidade de horas usinada analisando os custos iniciais (Fonte: Autores, 2017).

Ao se analisar o tubo vórtice, conclui-se que este poderá ser otimizado, com o intuito de aumentar a sua eficiência. Este fator influenciará diretamente nos custos de usinagem, ocasionando em uma redução dos valores gastos.

O tubo vórtices somente se tornará viável, se o seu processo de fabricação ou aquisição venha a ter um preço semelhante ao do fluido de corte.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho apontaram as seguintes conclusões:

- Observando os resultados obtidos termicamente, verificou-se que a melhor eficiência do dispositivo se deu com uma pressão de 8 bar de entrada de ar comprimido quando a válvula de saída de ar quente encontra-se aberta, chegando assim a uma temperatura de  $-7,8^{\circ}\text{C}$ .
- O tubo vórtices é de fácil instalação e aplicação.
- A utilização do fluido de corte teve em média um desempenho melhor do que a aplicação de ar comprimido gelado por tubo vórtices para as condições de corte propostas, no quesito de temperatura de usinagem.
- A utilização do ar frio na usinagem tende a diminuir a temperatura na zona de corte.
- Cavacos podem ser removidos facilmente com a utilização de ar comprimido, no processo de usinagem.
- A variação de temperatura é pequena para velocidade de corte próximas.
- Os resultados dos ensaios de faceamento rápido apontaram que a utilização do tubo vórtices tende a aumentar a vida útil da ferramenta.
- Materiais cujo cavacos são pequenos, tendem a ter melhor dissipação de calor na zona de corte.
- O efeito guarda-chuva pode ter alta influência nos resultados.
- Os custos de usinagem utilizando o fluido de corte possuiu maior eficiência ao se comparar com a utilização do tubo vórtices.
- Publicação nos anais do Encontro de Ciência e Tecnologia (ECT) - UnB Gama 2016 (Apêndice B).
- Artigo científico aceito no IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO (COBEF) (Apêndice C).



## 6. TRABALHOS FUTUROS

- Análise do desgaste das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios realizados, com o objetivo de verificar se são semelhantes para o mesmo modo de refrigeração e compará-los com outros.
- Fabricação de um tubo vórtices otimizado, e realização dos mesmos ensaios deste trabalho, com o intuito de comparar e analisar a viabilidade deste no processo de usinagem.
- Realização do ensaio de faceamento rápido, com maior número de ferramentas, para aumentar a amostra dos resultados.
- Comparação da rugosidade da peça usinada diante dos três modos de refrigeração utilizados neste trabalho: Tubo Vórtices, com aplicação de fluido emulsionável e usinagem a seco.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NB 15454, "Metalografia das ligas de ferro-carbono", Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

ABNT NB 513, "Classificação e aplicação de metais duros para usinagem com arestas de corte definidas – Designação dos grupos principais e grupos de aplicação", Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT NB 6189, "Aço Ferramenta", Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1982.

ALJUWAYHEL, N.F; NELLIS, G.F; KLEIN, S.A. Parametric and internal study of vortex tube using a CFD model. *Int. J. Refrigeration* 28, 442–450, 2005.

ALMEIDA, F. A. "Nano to micrometric grain sized CVD Diamond for turning hard and abrasive materials", Tese de doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de Aveiro, Portugal, 2007.

ALMOND, D.P; PENG, W. Thermal imaging of composites. *J. Microsc.* 201, 163-170; 2001.

AMORIM, H. "Processos de Fabricação por Usinagem", Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 16 p, 2003.

ATTANASIO, A. et al. "Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear". *Wear*. Elsevier B. V. Italy, 2005.

Callister, W.D., "Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução", John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CIMM. "Os materiais das ferramentas de corte". Disponível em <[http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/7058-os-materiais-das-ferramentas-de-corte](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7058-os-materiais-das-ferramentas-de-corte)> acesso em 12. Mar. 2017; 2010.

COCKERILL, T. T. "Thermodynamics and Fluid Mechanics of a Ranque – Hilsch Vortex Tube", University of Cambridge, 1998.

DINIZ, A. E; MACHADO, A. R; SALES, W.F. Application of cutting fluids in machining processes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*. Scielo. Rio de Janeiro – RJ, 2001

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais.8. ed.São Paulo: Artliber, 2013.

EL BARADIE, M.A. "Cutting fluids: Part I- Characterization". Journal of Material Processing Technology 56, 798-806, 1996.

FERRARESI, Dino. Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Edgard Blücher, 796p, 1977.

GAO, C. M. "Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube", Tese de PhD, University of Technology, Eindhoven, 159 p, 2005.

IM, S. Y; YU, S. S. Effects of geometric parameters on the separated air flow temperature of a vortex tube for design optimization. Journal Energy 37 (2012) 154-160, 2011.

ISO 3685 "Tool life testing with single point turning tools", International Organization for Standardization,1993.

KENNAMENTAL. "Torneamento: Princípios e Produtos para melhorar a produtividade", disponível em <<http://www.kennatech.com.br/admin/uploadck/files/Torneamento.pdf> >, acessado em 18 set 2016; 2014.

KRAUS, C.E; WEDDEL, R.R. "Determining the tool life cutting speed relationship by facing cuts", A.S.M.E., Fall Meeting, Erie, Pennsylvania, USA, 1934.

LIU, J; CHOU, Y. K. "On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al-Si alloys with vortex-tube cooling", International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, 635-645, 2007.

MACHADO A.R; SILVA, M. B; COELHO, R. T. Teoria da Usinagem dos Metais, 3ª ed. São Paulo; Edgard Blucher, 2015.

MARTYNOVSKII, V.S; ALEKSEEV, V.P. Investigation of the Vortex Thermal Separation Effect for Gases and Vapors. SovPhystech Phys, 1957.

METALS HANDBOOK. Machining. Vol. 16. ASM,1989.

METALS HANDBOOK. Heat Treating of Steels. 10ed. Ohio: American Society for Metals, Vol.4, 1991.

MIRANDA, G.W.A. “Uma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro revestida com TiAlN” Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, 175 p.,2003.

MIRANDA, Nuno Miguel Coelho de. “Influência dos parâmetros de corte no torneamento de metal duro sinterizado”, Dissertação de Mestrado, Faculdade Tecnologia Senai Cimatec, 145 p, 2010.

NBR 6163, “Geometria da cunha de corte”, Norma Brasileira Registrada, 1990.

NEX-FLOW. “Vortex Tubes For Spot Cooling From Nex Flow”, disponível em <[http://www.nex-flow.com/vortex\\_tube.htm](http://www.nex-flow.com/vortex_tube.htm)>, acessado em 27 set 2016.

PATWARI, A. U; HABIB M.A; CHOWDHURY M. S; RANA M. “Thermal Investigation of Vortex Generated Green Coolant on Surface Texture for Drilling Process”, 6th BSME International Conference on Thermal Engineering, pp 808-813, 2014.

REIS, A. M. Influência do ângulo de posição secundário da ferramenta, raio da ponta e lubrificação na usinagem em presença de aresta postiça de corte. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2000.

REIS, R. “Estudo da Influência da Geometria da Cunha da Ferramenta de Aço Rápido na Usinagem do Aço ABNT 1045 em Diferentes Condições Lubri-Refrigerantes”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 121 p, 2015.

SAE J 1887 ” Automotive Compacted Graphite Iron Castings”, Society of Automotive Engineers,2002

SAIDI, M. H; VALIPOUR, M. S. “Experimental Modeling of Vortex Tube Refrigerator”, ApplThermEng 23:1971–1980, 2003.

SANCHES, Henrique Augusto Belizario. “Avaliação do Processo de Usinagem com Corte Interrompido Utilizando a Análise de Esforços e Frequências”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 123 p, 2011.

SANDVIK. Matching Tools. Disponível em < <http://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/pages/productdetails.aspx?c=cnmg%2012%2004%2008-pm%204325&m=6265883>> acesso em 12. Mar. 2017; 2012.

SELEK, M; TASDEMIR, S; DINCER, K; BASKAYA, S. “Experimental examination of the cooling performance of Ranque-Hilsch vortex tube on the cutting tool nose point of the turret lathe through infrared thermography method” International Journal of Refrigeration 34, pp 807-815, 2011.

SHAW, M.C. “Metal cutting principles”. 2ª ed. New York: Oxford University Press, 2005.

SILLIMAN, J. D. “Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application”. Society of Manufacturing Engineers. 2ª ed. p.1-47, 1992.

SILVA, Oseas Carlos da. “Sistema de refrigeração por tubo de Ranque-Hilsch com abastecimento de instalação de ar comprimido para alimentação com fonte solar fotovoltaica”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, 88 p, 2014.

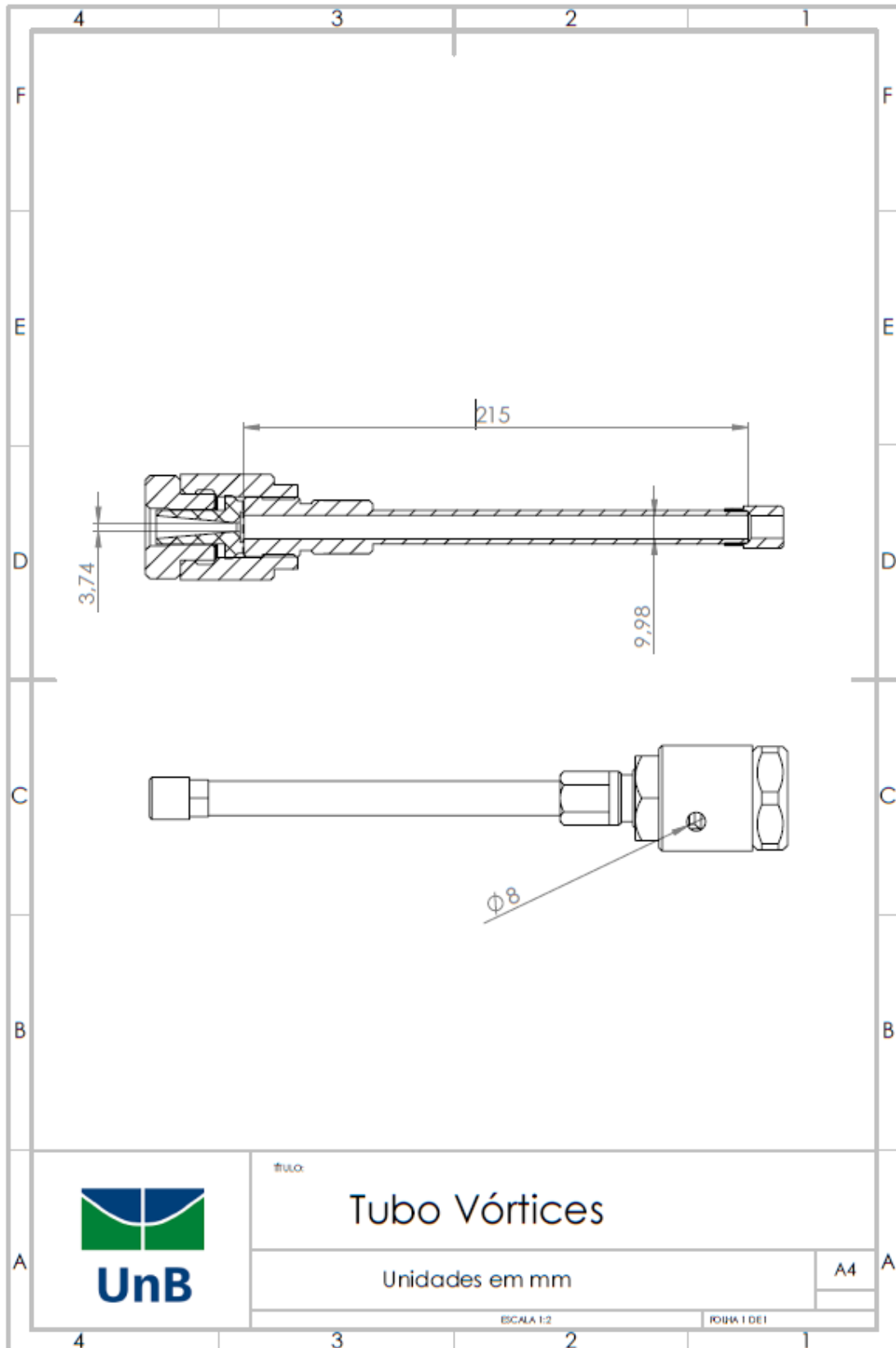
TRENT, E. M. Metal cutting. 2ª edition, Butterworths, 1984.

WERTHEIM, R; SATRA, A; BER, A. “Modifications of the Cutting Edge Geometry and Chip Formation in Milling”, CIRP Annals- Manufacturing Technology, 1994.

WHITE, Charles V; ASM Handbook, 9ª Ed; ASM International, vol. 1. 1998.

# APÊNDICES

## APÊNDICE A - MEDIDAS DO TUBO VÓRTICES UTILIZADO



## **Estudo do Tubo de Vórtices no Torneamento**

Davi Pires Araújo, Denis Barbosa Souza, Danilo dos Santos Oliveira, Jhon Goulart, Rhander Viana

Universidade de Brasília - Faculdade do Gama (UnB/FGA)

Área Especial 2 Lote 14 Setor Central – 72405-610 Gama, DF, Brasil - Telf: +55 61 3384 3443

E-mail: [davidaviaraujo@hotmail.com](mailto:davidaviaraujo@hotmail.com), [denis\\_dbs@hotmail.com](mailto:denis_dbs@hotmail.com), [jvazgoulart@gmail.com](mailto:jvazgoulart@gmail.com),  
[rhanderviana@gmail.com](mailto:rhanderviana@gmail.com)

### **RESUMO**

O tubo de vórtices é um dispositivo mecânico utilizado na conversão de energia cinética do ar em energia térmica. O objetivo deste trabalho é analisar o tubo de vórtices no processo de torneamento, especificamente, no faceamento rápido de um aço ABNT 1045 utilizando ferramentas de aço rápido com 10% de Co. Os resultados mostraram que no faceamento rápido utilizando o tubo de vórtices, a vida da ferramenta aumentou em 20% em relação ao processo a seco, uma vez que o colapso da ferramenta ocorreu com diâmetro de usinagem de 198,20 mm.

### **1. INTRODUÇÃO**

Ranque em 1930 projetou um dispositivo mecânico capaz de gerar dois fluxos em sentidos contrários com temperaturas diferentes, baseando-se exclusivamente na sua geometria, com apenas uma entrada de fluido de gás comprimido. Este equipamento ficou conhecido como tubo vórtice. Válvulas podem ser adicionadas para auxiliar no escoamento do fluido e para regular a quantidade de saída mássica de ar frio e quente.

Existem diversas teorias que tentam explicar o fenômeno que ocorre para que haja a separação térmica. A que há mais adeptos, é que os vórtices internos e externos possuem mesma direção e velocidade angular. O princípio da conservação do momento angular garante que o fluxo interno deveria ser maior que o externo, porém neste caso ele é violado, os fluxos possuem a mesma velocidade. O vórtice externo se aquece devido à energia perdida pelo vórtice interno. Dessa maneira, há a separação térmica, o fluxo externo se aquece e o interno se resfria (Gao, 2005).

As temperaturas alcançadas por este tubo são significativas, variando entre -46°C a 127°C.

O dispositivo com saída de ar do tipo unifluxo é dado pela saída de ar em apenas uma direção e sentido, tendo assim apenas uma entrada e uma saída de ar. A Figura (1) demonstra o princípio do funcionamento desta configuração. O ar comprimido é injetado tangencialmente na câmara de vórtice, e são gerados dois fluxos. O fluxo interno é responsável pela saída de ar frio, e o externo pela saída de ar quente, ambos possuem o mesmo sentido. A separação térmica é realizada

por uma válvula na extremidade do tubo. Esta maneira com o que os fluxos de ar saem para atmosfera, ocasiona em uma baixa utilização desta configuração (Cockerill, 1998).

As análises feitas se basearam na vida da ferramenta de aço rápido com 10% Co. O processo de torneamento foi utilizado para tal ensaio. Sendo que o para o faceamento rápido o avanço e a profundidade de corte são invariantes no tempo. O principal ponto que irá se modificar neste experimento será a velocidade de corte, com isto a ferramenta de corte virá ao colapso.

A Figura (1) explicita a nomenclatura dos componentes do tubo de vórtices.

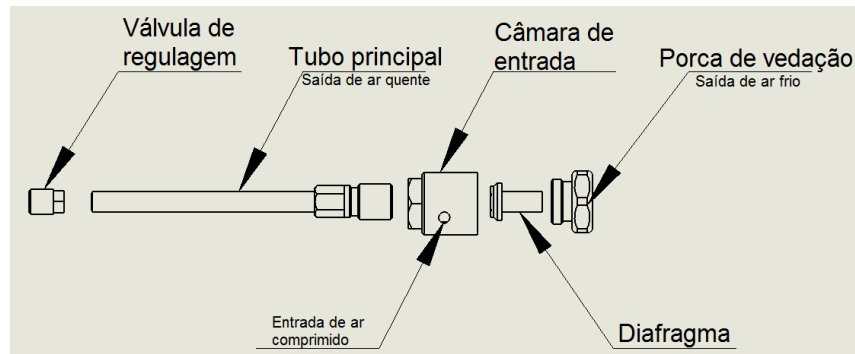


Figura 1 – Componentes do tubo de vórtices (Fonte: Autores, 2016).

## 2. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

A fim de verificar o desempenho do tubo de vórtices quanto a temperaturas de saída de ar frio como saída de ar quente, algumas técnicas de medições podem ser aplicadas. Alguns pesquisadores desenvolveram a técnica termográfica de infravermelhos atuando a investigação de temperatura sobre o ponto de corte da ponta da ferramenta. Esta técnica consiste em análise não destrutiva, além de se tratar de um exame térmico rápido com larga escala de capacidade de detecção de ondas térmicas a partir de uma certa distância.

Atualmente são preferíveis câmeras de alta resolução pelo fato desta possuir uma maior capacidade de obtenção com grante capacidade de memória e capacidade de realizar processos complexo. A configuração experimental por meio de câmera termográfica é simples podendo ser adaptada a qualquer projeto e processo de usinagem afim de obter temperaturas a partir imagens elaboradas pela câmera. A Figura 2 exemplifica uma configuração da disposição da câmera térmica no processo de torneamento utilizando tubo de vórtices.



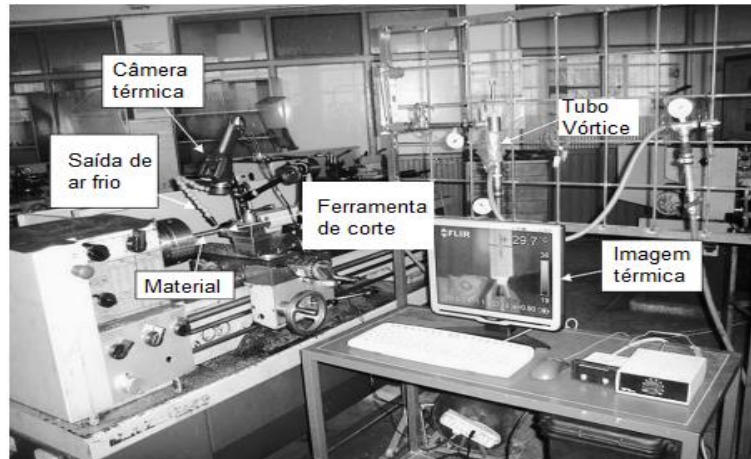


Figura 2 - Configuração experimental – Câmera Termográfica. Fonte: (Adaptado de Selek *et al.*, 2010)

No processo de usinagem a diminuição da temperatura em que a ferramenta trabalha traz consigo vários benefícios, tais como aumento da vida útil da ferramenta, diminuição da rugosidade da peça. Além disso, no caso do tubo de vórtices, é um dispositivo ecologicamente correto não necessitando utilização de óleos lubrificantes ou refrigerantes. No Gráfico 1 podemos observar a redução da rugosidade utilizando o tubo de vórtices no processo de fresamento CNC com uma ferramenta Sandvik. A comparação do processo de fresamento com tubo de vórtices e com fluido de corte é mostrada a seguir.

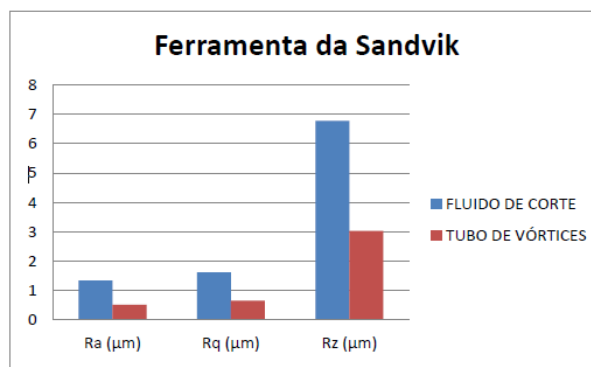


Gráfico 1- Rugosidade da peça usinada com a ferramenta Sandvik. Fonte: (Nogueira R.S. *et al.*, 2015)

### 3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

As análises efetuadas a fim de verificar o desempenho de um tubo de vórtices quanto a temperaturas de saída de ar fria quanto saída de ar quente foram elaboradas com a utilização de uma câmera termográfica. A área de medição da temperatura foi pintada de preto fosca a fim de obter

resultados mais próximos do real. As temperaturas obtidas foram submetidas as condições de um tubo de vórtices com entrada de 7,89 bar de pressão, a calibragem instrumento de medição foi feita antes da medição. Na Figura 3 (a) podemos observar a temperatura do tubo próximo na saída de ar frio. Na Figura 3 (b) podemos observar a temperatura do tubo próximo na saída de ar quente.

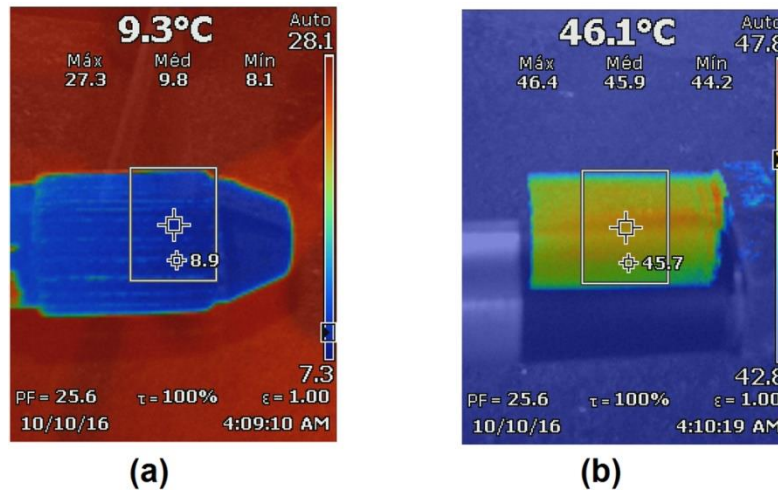


Figura 3 - Temperaturas nas saídas de ar do tubo de vórtices: (a) saída de ar frio; (b) saída de ar quente. Fonte: (Próprios autores, 2016).

#### 4. CONCLUSÕES

Deste estudo inicial do tubo de vórtices conclui-se que a utilização do mesmo no processo de usinagem conduz a resultados melhores. Tais resultados obtidos foram significativos para o objetivo do trabalho, tendo em vista baixas temperaturas para a saída de ar frio.

#### 5. REFERÊNCIAS

1. **Cockerrill T.** Thermodynamics and Fluid Mechanics of a Ranque – Hilsch Vortex Tube, University of Cambridge, 1998.
2. **Gao, C.** Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube, Tese de PhD, University of Technology, Eindhoven, 2005.
3. **Nogueira R.S., Giaconete H.** Refrigeração do processo de fresamento do aço ABNT 8640 com auxílio de tubo de vórtices. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Paulista, 2015.

APÊNDICE C – ARTIGO CIENTÍFICO ACEITO NO IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO (COBEF)

## REFRIGERAÇÃO POR TUBO VÓRTICES NO FACEAMENTO RÁPIDO DO AÇO ABNT 1045

Davi Pires Araújo, davidaviaraujo@hotmail.com<sup>1</sup>

Denis Barbosa Sousa, denis\_dbs@hotmail.com<sup>1</sup>

Danilo dos Santos Oliveira, unbdanilo@gmail.com<sup>1</sup>

Rafael Nogueira Santos, nogueirasantos@gmail.com<sup>2</sup>

Jhon Nero Vaz Goulart, jvazgoulart@gmail.com<sup>1</sup>

Rhander Viana, rhanderviana@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília Campus-Gama, Área Especial de Indústria Projeção A, CEP: 72444-240, Brasília-DF

<sup>2</sup>Faculdade de Tecnologia Senai Ítalo Bologna, Rua Armogaste J. Silveira, n° 612, CEP: 74560-020, Goiânia-GO

**Resumo:** O tubo vórtices é um dispositivo totalmente mecânico capaz de produzir dois fluxos de ar em sentidos contrários, com temperaturas diferentes, ar quente e ar frio, baseando-se exclusivamente na sua geometria, com apenas uma entrada de ar comprimido. Este dispositivo tem sido estudado cada vez mais, com o propósito de verificar sua eficiência e possíveis aplicações. Neste trabalho o objetivo é aplicar o ar frio gerado pelo tubo vórtice na refrigeração do processo de torneamento, especificamente, no faceamento rápido de um disco de aço ABNT 1045 com ferramenta de aço-rápido com 10% de cobalto, comparando com o processo sem refrigeração e a jorro. Os resultados mostraram que a aplicação do tubo vórtices aumentou a vida da ferramenta de aço-rápido em 14,82%, se comparado a utilização de refrigeração por jorro, possibilitando o faceamento do aço ABNT 1045 por 122,15 mm de diâmetro antes de seu colapso por deformação plástica.

**Palavras-chave:** Tubo vórtices, faceamento rápido, refrigeração, deformação plástica.

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem atualmente são bem difundidos, estando presentes nas etapas de fabricação da maioria dos produtos industrializados. De acordo com Trent (1984), o processo de fabricação mais popular no mundo é o de remoção de material com produção de cavaco. Neste há mais adeptos pela capacidade de fabricar peças com grau de tolerância desejado, custo e produtividade.

Os processos mais comuns utilizados pela indústria são: furação, fresamento, torneamento, rosqueamento, brunimento, brochamento e mandrilamento. Nestes há a necessidade de utilizar fluidos de corte com o intuito de refrigerar e/ou lubrificar o processo de usinagem, com o objetivo de aumentar a vida útil da ferramenta e, também, melhorar a qualidade superficial da peça.

No trabalho realizado por Diniz *et al.* (2013), observou-se a busca por processos de usinagem que utilizam pouco ou nenhum fluido de corte, sem alterar o objetivo da utilização deste. Tal acontecimento está sendo proposto pelos riscos entre o contato do fluido de corte com o operador. Segundo Miranda (2003), trabalhadores expostos ao fluido de corte possuem 50% de chance a mais de adquirirem câncer quando se comparado aos trabalhadores que não tem contato com fluido.

Além do risco de câncer mencionado acima, os fluidos de corte em geral não possuem descarte adequado. Podendo poluir o meio ambiente. Há busca por um novo método de refrigeração da ferramenta de corte na usinagem também está sendo impulsionada, uma vez que o fluido de corte 16% do custo final de fabricação da peça. Nesta porcentagem estão incluídas aquisição, preparo, descarte e armazenamento (Machado *et al.*, 2009).

Mediante os pontos inferidos anteriormente, buscou-se uma refrigeração a qual seria de baixa aquisição e minimizaria os riscos. A utilização do ar comprimido para tal função mostrou-se como uma boa alternativa. Nesta não há a preocupação com todos os trâmites do fluido de corte e em relação a saúde do operador.

Este trabalho tem por objetivo o estudo e aplicação de ar comprimido mediante a utilização do tubo vórtices na usinagem, especificamente no torneamento. O intuito é investigar um novo sistema lubri-refrigerante na usinagem, os resultados dos ensaios serão comparados com o sistema a seco e a jorro.

## 2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A seguir serão apresentados os materiais e a metodologia necessária para execução deste trabalho.

### 2.1. Materiais

Na realização deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

- Torno convencional modelo Mascote MS-205 - Nardini;
- *Bits* de aço-rápido da classe M2 com 10% de cobalto e seção quadrada 3/8" x 3/8" e 6" de comprimento;
- Disco de aço ABNT 1045 com diâmetro de 200 mm e 60 mm de espessura;
- Fluido de corte solúvel sintético de base vegetal ME-3 - Quimatic/Tapmatic;
- Compressor Schulz 175 lbf/pol<sup>2</sup>;
- Relógio comparador com resolução de 0,01 mm - Mitutoyo;
- Paquímetro de 6" - Starrett;
- Tubo vórtices desenvolvido pelo Senai-Ítalo Bologna de Goiânia-GO;
- Câmera termográfica - Fluke Ti90.

### 2.2. Metodologia

A metodologia utilizada para realização deste trabalho consiste em 3 etapas: ensaios de temperatura nas saídas do tubo vórtices, caracterização do diâmetro usinado e ensaios de facemaneto rápido.

### 2.2.1. Tubo Vórtices

O tubo vórtices é um dispositivo mecânico sem partes móveis. Podendo ser encontrado em duas configurações: unifluxo e contrafluxo, a que será utilizada neste trabalho será a segunda. Esta possui uma única entrada de ar comprimido, uma câmara de vórtice, um ducto de saída de ar frio e um ducto de saída de ar quente. Válvulas podem ser adicionadas para auxiliar no escoamento do fluido e para regular a quantidade de saída mássica de ar frio e quente.

A eficiência deste dispositivo está atrelada a alguns parâmetros como a dimensão do tubo, geometria das válvulas de regulagem e da câmara de entrada. Para melhor exemplificação de como estão dispostas as peças e componentes do tubo vórtices a Fig. (1) explicita a nomenclatura destes para melhor entendimento. Este dispositivo foi construído no Senai-Ítalo Bologna de Goiânia.

Há registros de temperaturas significativas alcançadas por este tubo, variando entre -46°C a 127°C (Anayet, 2014).

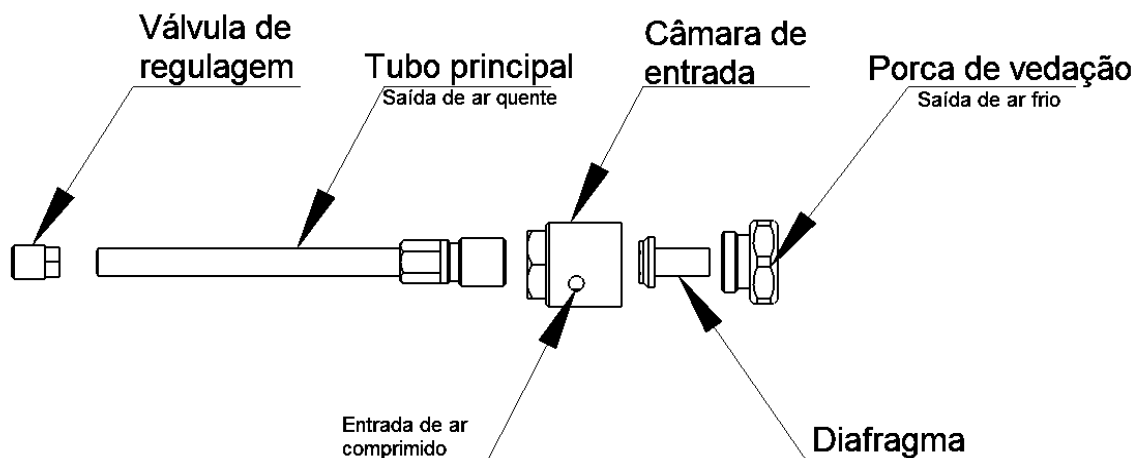


Figura 1. Tubo Vórtices e seus componentes.

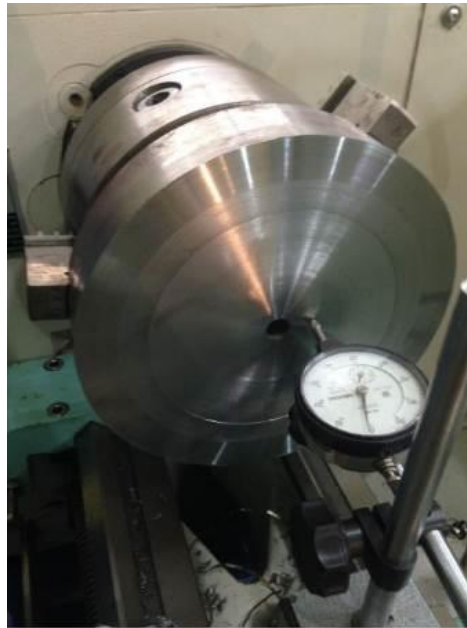
### 2.2.2. Ensaios de Temperatura

A instrumentação utilizada com o intuito de verificar o funcionamento do tubo vórtices, foi realizada por meio de uma câmera termográfica, cujo objetivo foi medir as temperaturas de entrada e saída do tubo. A câmera termográfica tem como principal objetivo exibir uma imagem da radiação térmica emitida por um corpo. As imagens capturadas pela câmera foram processadas por meio do *software SmartView*, cujo objetivo foi encontrar o gradiente de temperatura, através de uma linha, a qual capta a região a ser mensurada, inserida no arquivo.

O princípio de funcionamento da câmera é capturar a radiação térmica emitida pelo objeto que está na área demarcada pelas lentes da câmera, estas convertem em energia que é concentrada por milhares de sensores infravermelhos em um sinal eletrônico. O sinal é processado com o intuito de mostrar uma imagem ou vídeo térmico no *display* da câmera (Flir, 2016).

### 2.2.3. Caracterização do Diâmetro Usinado

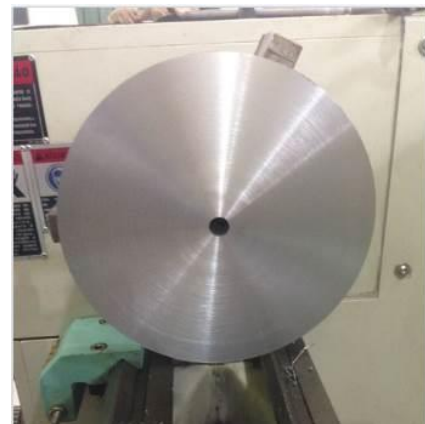
O objetivo desta etapa foi identificar a posição do ressalto formado na peça usinada, ocasionado pela deformação plástica da ferramenta durante a usinagem, e medir o diâmetro usinado. A caracterização do ressalto pode ser vista sem o auxílio de equipamentos, porém para padronizar os ensaios, normalizou-se um valor de ressalto de 0,3 mm, que foi medido através de um relógio comparador Mitutoyo com resolução de 0,01 mm. A Figura (2) ilustra a medição do degrau formado. Depois de localizado o ressalto formado, a medição do diâmetro usinado foi realizada com o auxílio de um paquímetro.



**Figura 2. Montagem do relógio comparador para medição do ressalto formado.**

#### **2.2.4. Ensaio de Faceamento Rápido**

Neste ensaio foi utilizado um torno convencional Nardini modelo Mascote MS-205, utilizando ferramentas (*bits*) de aço-rápido da classe M2 com 10 % de cobalto e seção quadrada 3/8" x 3/8" e 6" de comprimento, um disco de aço ABNT 1045 com diâmetro de 200 mm e 60 mm de espessura. Este ensaio consistiu em facear um disco, utilizando o torno, com rotação e avanço constantes. Tendo como marco inicial a ferramenta de corte localizada no centro do disco e indo em direção ao diâmetro externo. Este processo causa o aumento na velocidade de corte, conseqüentemente, ocasiona em um determinado ponto de usinagem, o colapso da ferramenta. Este ponto de colapso da ferramenta é de fácil visualização na superfície usinada. Na Figura (3) pode ser observada a montagem do experimento.



**Figura 3. Montagem do experimento de faceamento rápido.**

A Tabela (1) indica os parâmetros utilizados no ensaio de faceamento rápido do aço ABNT 1045.

**Tabela 1. Condições de corte e geometria da ferramenta no faceamento rápido do Aço ABNT 1045.**

<b>Ensaio de Faceamento Rápido do Aço ABNT 1045</b>	
Rotação - rpm	400
Avanço - mm/rot	0,167
Profundidade de corte - mm	0,5
Ângulo de saída	12°
Ângulo de folga	8°
Ângulo de posição	75°

As condições de corte foram iguais para todos os ensaios. As condições de refrigeração da ferramenta foram diferentes, sendo elas a seco, com jorro de fluido de corte e ar comprimido refrigerado com a utilização do Tubo Vórtices. Para estas três condições observou-se a vida útil da ferramenta, por meio do seu colapso por deformação plástica. Para cada condição realizou-se três ensaios. A Figura (4) ilustra o ensaio de faceamento rápido a seco.



**Figura 4. Faceamento rápido a seco.**

Para a aplicação do fluido de corte em jorro foi utilizado o bocal de injeção já montado no torno com fluido emulsionável ME-3 Quimatic/Tapmatic na proporção 1:10. A Figura (5) ilustra o ensaio de faceamento rápido com aplicação de jorro de fluido de corte. A vazão com que o fluido de corte é aplicado na ferramenta foi de 2,7 l/min.



**Figura 5. Faceamento rápido com jorro de fluido de corte.**

Para os ensaios de faceamento rápido com a utilização do Tubo Vórtices, o dispositivo foi fixado no torno com pressão de entrada de 8 bar, uma vez que essa pressão teve o melhor desempenho na diminuição da temperatura na saída de ar frio do tubo vórtice, como mostra a Tab. (2). A Figura (6) ilustra o ensaio de faceamento rápido com a utilização do Tubo Vórtices.



**Figura 6. Faceamento rápido com utilização do Tubo Vórtices.**

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Medição da Eficiência Térmica do Dispositivo

Nas análises iniciais, variou-se a pressão três vezes (4, 6 e 8 bar) e a válvula de regulagem foi modificada em duas configurações, aberta e fechada. Na Tabela (2), foram indicados os melhores valores obtidos através do *software SmartView*, sendo que TQ e TF significam temperatura quente e fria, respectivamente.

**Tabela 2. Relação entre temperaturas, pressão e abertura de válvula.**

Pressão	Saídas de ar	Válvula aberta	Válvula fechada
4 bar	Quente	34,2°C	42,8°C
	Frio	4,2°C	5,5°C
6 bar	Quente	36,5°C	44,2°C
	Frio	0,2°C	2,5°C
8 bar	Quente	38,8°C	44,7°C
	Frio	-7,8°C	2,3°C

Através da Tab. (2) pode-se observar que ao abrir a válvula de regulagem, obtém-se menores temperatura na extremidade fria. As temperaturas na saída de ar frio e na saída de ar quente variam de acordo com a pressão de entrada do tubo vórtices, como também com a variação da abertura da válvula de saída de ar quente.

No gráfico da Fig. (7) é possível observar a relação das temperaturas com a pressão injetada. Os melhores valores obtidos relacionaram-se com a pressão de 8 bar, como pode ser observada na figura abaixo, onde TQA, TFA, TQF e TFF indicam a temperatura na saída de ar quente com a válvula aberta, temperatura na saída de ar frio com a válvula aberta, temperatura na saída de ar quente com a válvula fechada e temperatura na saída de ar frio com a válvula fechada, respectivamente.



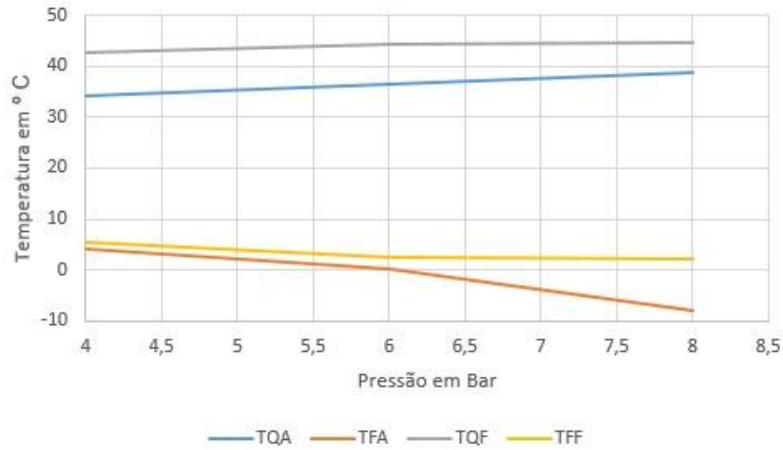


Figura 7. Relação entre temperatura e pressão

A Figura (8-a) indica o maior valor de temperatura obtido nos experimentos. Com auxílio do software uma linha foi inserida na imagem com o intuito de obter o gradiente de temperatura. Na Figura (8-b) obteve-se o gráfico de variação da temperatura.

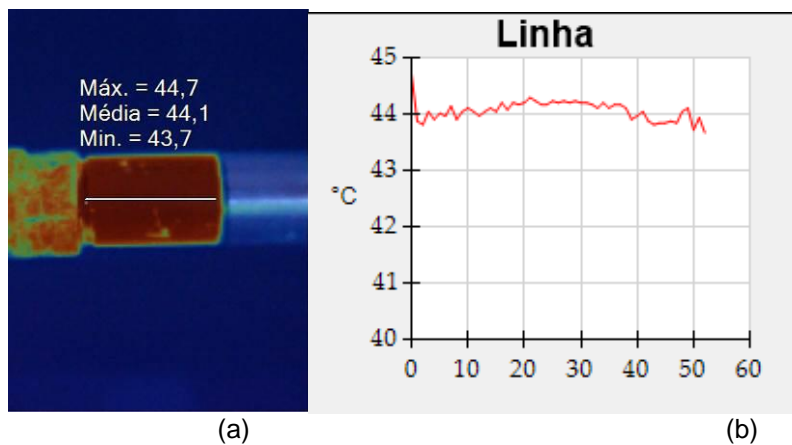


Figura 8. Gradiente de temperatura na saída de ar quente

O fluido que foi inserido no processo de torneamento está relacionado com a temperatura na saída fria do dispositivo. Na Figura (9-a) ilustra os melhores valores de temperatura no duto frio, e na Fig. (9-b) tem-se o gráfico da variação de temperatura no duto.

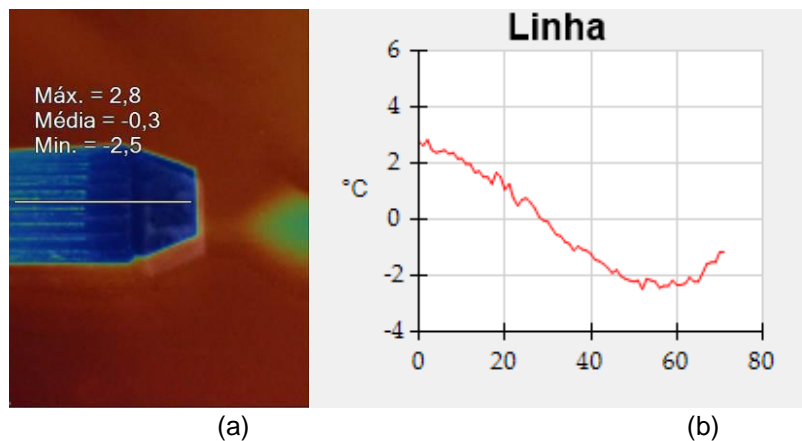
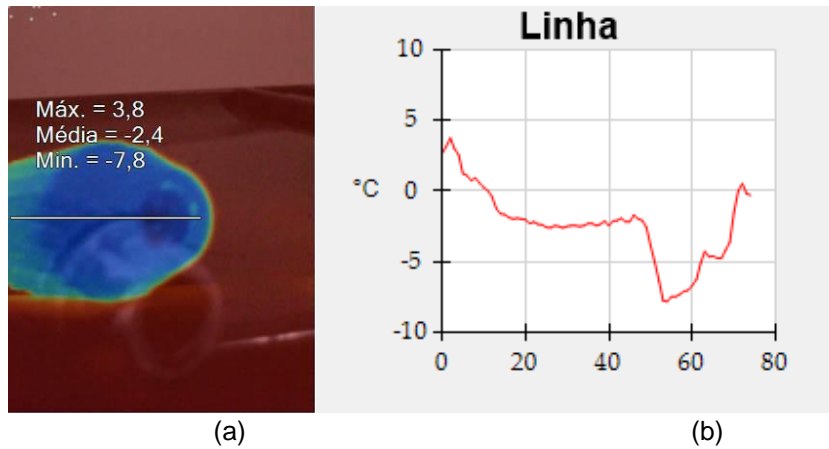


Figura 9. Gradiente de temperatura na saída de ar frio

De posse da menor temperatura no duto, tirou-se uma foto frontal do bico de saída fria para uma melhor análise, observou-se uma queda de temperatura, podendo ser vista na Fig. (10-a), também foi plotado o gráfico da variação de temperatura na Fig. (10-b).



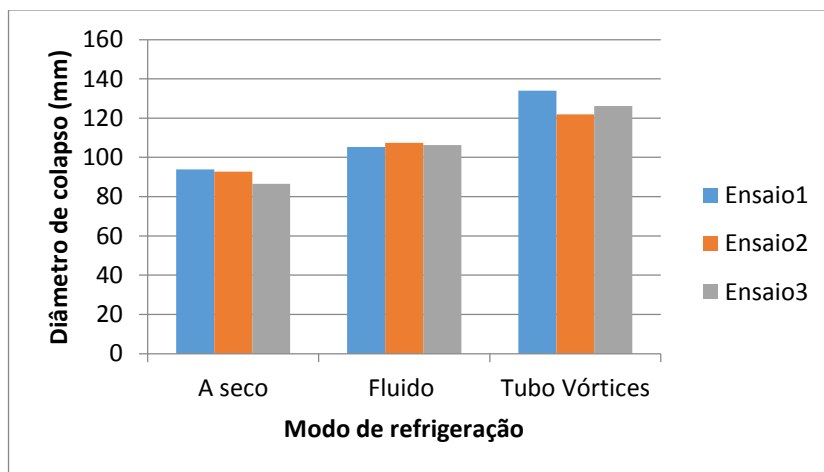
**Figura 10. Gradiente de temperatura da vista frontal da saída de ar frio**

### 3.2. Medição do Diâmetro de Colapso

A Figura (11) demonstra os resultados obtidos no ensaio de faceamento rápido para as mesmas condições de corte, alterando apenas o modo de refrigeração da ferramenta de corte. Para os ensaios realizados obtiveram-se os valores de 91,07 +/- 3,85 mm, 106,38 +/- 1,04 e 122,15 +/- 2,37 para o a seco, jorro de fluido e com a utilização do tubo vórtices, respectivamente.

Observa-se que com a aplicação do fluido, a ferramenta entra em colapso em um diâmetro maior do que quando não se aplica nenhuma refrigeração na ferramenta, ou corte a seco, ocasionando em um aumento de 16,81% de aumento da vida útil da ferramenta. Tal fato já era esperado, pois a função do fluido é refrigerar e ou lubrificar a ferramenta, prolongando assim seu desempenho.

Já ao se utilizar o tubo vórtices, o ar frio foi direcionado para ponta da ferramenta de corte, cujo objetivo era diminuir a temperatura na zona de corte. O comprimento usinado, foi 14,82% superior ao jorro de fluido. Tais resultados foram satisfatórios, mostrando-se viável a utilização de ar comprimido no processo de usinagem.



**Figura 11. Resultados do faceamento rápido em diferentes condições de refrigeração.**

#### 4. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho apontaram as seguintes conclusões:

- Observando os resultados obtidos termicamente, verificou-se que a melhor eficiência do dispositivo se deu com uma pressão de 8 bar de entrada de ar comprimido, quando a válvula de saída de ar quente encontra-se aberta, chegando assim a uma temperatura de  $-7,8^{\circ}\text{C}$ ;
- Os cavacos podem ser removidos facilmente com a utilização de ar comprimido;
- A utilização do ar frio na usinagem tende a diminuir a temperatura na zona de corte;
- Os resultados dos ensaios de faceamento rápido apontaram que a utilização do tubo vórtices aumenta a vida útil da ferramenta,
- O tubo vórtices é de fácil instalação e aplicação.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao curso de Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília Campus-Gama e o Senai Italo-Bologna unidade de Goiânia-GO.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Anayet U. P.; Habib M.A.; Chowdhury M. S.; Rana M., 2014. "Thermal Investigation of Vortex Generated Green Coolant on Surface Texture for Drilling Process", 6th BSME International Conference on Thermal Engineering, pp 808-813.
- Diniz, A. E.; MarcondesF. C.; Coppini, N. L., 2013, "Tecnologia da usinagem dos materiais". 8. Ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 272 p.
- Flir, 2016, "Thermography", disponível em <http://www.flir.com/thermography/americas/br/view/?id=55706>, acessado em 18 nov 2016.
- Machado, A.R.; Abrão, A.M.; Coelho, R.T.; Silva M. B., 2009. "Teoria da Usinagem dos Materiais". Editora Edgard Blucher, 1ª Ed., 371 p.
- Miranda, G.W.A., 2003. "Uma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro revestida com TiAlN" Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, 175 p.
- Trent, E. M., 1984, "Metal cutting". 2ª edition, Butterworths.

#### 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## VORTEX TUBE AIR COOLING IN THE RAPID FACING ABNT 1045 STEEL

Davi Pires Araújo, davidaviaraujo@hotmail.com<sup>1</sup>  
Denis Barbosa Sousa, denis\_dbs@hotmail.com<sup>1</sup>  
Danilo dos Santos Oliveira, unbdanilo@gmail.com<sup>1</sup>  
Rafael Nogueira Santos, nogueirasantos@gmail.com<sup>2</sup>  
Jhon Nero Vaz Goulart, jvazgoulart@gmail.com<sup>1</sup>  
Rhander Viana, rhanderviana@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília Campus-Gama, Área Especial de Indústria Projeção A, CEP: 72444-240, Brasília-DF

<sup>2</sup>Faculdade de Tecnologia Senai Ítalo Bologna, Rua Armogaste J. Silveira, n° 612, CEP: 74560-020, Goiânia-GO

**Abstract:** *The vortex tube is a fully mechanical device capable of producing two streams of air in opposite directions, with different temperatures, hot air and cold air, based exclusively on its geometry, with only one air inlet. This device has been studied more and more, with the purpose of verifying its efficiency and possible applications. In this work the objective is to apply the cold air generated by the vortex tube in the cooling of the turning process, specifically, in the rapid facing of an ABNT 1045 steel disc with a 10% cobalt high speed steel tool, compared to the process without refrigeration and wet. The results showed that the application of the vortex tube increased the life of the high speed steel tool by 14,82 %, compared to the use of wet cooling, making it possible to face ABNT 1045 steel by 122,15 mm in diameter before its collapse by plastic deformation.*

**Keywords:** *Vortex tube, Rapid Facing, Cooling, Plastic deformation.*