

## AVALIAÇÃO DA REFRIGERAÇÃO POR AR GELADO NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

**Saulo Melotti**

**Rodrigo Keller**

**Ariel Paulo Rezende**

Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser – Rua Arno Waldemar Dohler, 308 - Santo Antônio 89.218-153 - Joinville – SC

saulo.melotti@sc.senai.br

rodrigo.keller@sc.senai.br

ariel.rezende@sc.senai.br

**Jean Pierre Sauron**

Widecoat - Rua Cel. Francisco Inácio, 215 - Vila Moinho Velho, São Paulo/SP

desenvolvimento@widecoat.com.br

**Resumo.** Nos processos de usinagem, o corte de material resulta em aquecimento da ferramenta/peça e a remoção de calor é geralmente realizada pela aplicação de agentes lubri-refrigerantes. Como alternativa ao meio de refrigeração convencional (fluido de corte líquido em abundância), o ar gelado é uma opção que proporciona redução no desgaste e também na falha da ferramenta por choque térmico durante o corte interrompido. Outra importante vantagem é o apelo ambiental, visto que não há necessidade de descarte de fluido. O presente artigo traz uma comparação entre o desempenho do ar gelado gerado com tubo de vórtice e o fluido refrigerante líquido na minimização do desgaste da ferramenta durante o corte do aço SAE 4340 pelo processo de torneamento. Como resultado, observou-se uma durabilidade de aproximadamente 25% maior na vida da ferramenta arrefecida com ar gelado para o conjunto de parâmetros de corte e configuração do sistema de ar gelado adotados.

**Palavras chave:** Torneamento. Ar gelado. Tubo de vórtice. Vida de ferramenta.

### 1. INTRODUÇÃO

A aplicação de líquido refrigerante proporciona algumas vantagens como, por exemplo: auxiliar na remoção dos cavacos da zona de corte, limitar a difusão química entre ferramenta e peça além de proteger a superfície das peças da corrosão (RUBIO et al., 2015). A propriedade de lubrificação do fluido auxilia ainda a reduzir as forças de atrito e consequentemente a geração de calor.

Entretanto, este modo de refrigeração aplicado nos processos de usinagem é um risco potencial para saúde do trabalhador, os óleos lubri-refrigerantes têm custo elevado e causam preocupações ambientais em se tratando do seu descarte. De acordo com Sankar e Choudhury (2015), os custos de usinagem é um aspecto relevante a ser considerado no valor da peça e os custos associados com o uso de fluídos de corte líquido representam aproximadamente 15% a 20% do custo do produto usinado. Outros problemas associados são: elevando o custo de eliminação de resíduos, fluidos de corte perdidos durante o processo de usinagem, limpeza adicional da peça de trabalho.

Sendo assim, propõem-se neste estudo de caso avaliar a refrigeração por ar gelado como alternativa ao modo de refrigeração comumente adotada. Os fatores que motivam este trabalho estão relacionados às possíveis vantagens da aplicação do ar gelado como agente refrigerante e dividem-se em:

Questões ambientais:

- Redução dos danos ao meio ambiente por evitar descarte de fluido de corte;
- Contribui para a manutenção da saúde do operador de máquina;

Questões econômicas:

- Redução dos gastos com compra de fluido de corte/lubri-refrigerante, sendo necessário apenas o compressor (já existente) para fornecer ar comprimido na pressão de trabalho requerida pelo sistema de ar gelado;
- Evitar a falha da ferramenta por choque térmico;
- Redução do desgaste da ferramenta pela redução da temperatura na região de corte;
- Evitar problemas relacionados à dilatação da peça e melhora acabamento superficial e a precisão dimensional;

Diante destas questões, o presente trabalho tem por objetivo verificar e quantificar a redução no desgaste de ferramenta que a refrigeração por ar gelado proporciona no processo de usinagem por torneamento e assim justificar quantitativamente a vantagem do uso do ar gelado em relação ao líquido refrigerante.

Segundo Liu e Chou (2007), a velocidade de corte é o parâmetro que ocasiona maior aquecimento durante o corte do material. Nos estudos da refrigeração por ar gelado utilizando tubo de vórtice, estes autores verificaram que apesar do aumento da dissipação de calor pela refrigeração por ar gelado, o resfriamento induz sempre um fluxo de calor maior na ferramenta, o que equilibra a capacidade de resfriamento. O aumento da velocidade de corte e avanço irá diminuir a eficácia de refrigeração por ar gelado nas reduções relativas da temperatura devido ao aumento do fluxo de calor e da fonte de calor. Verificaram ainda que a condição de baixo avanço e alta velocidade de corte é a mais eficaz para reduzir o desgaste de flanco da ferramenta utilizando refrigeração por ar gelado.

Rahman et al. (2003) avaliaram a aplicação do ar gelado no processo de fresamento e compararam os seguintes parâmetros: esforços de corte, rugosidade, superficial da peça, desgaste de flanco da ferramenta e análise dos cavacos via microscopia eletrônica de varredura. Realizaram testes considerando dois métodos de lubri-refrigeração: fluido convencional e ar gelado e compararam com o corte a seco. Os autores concluíram que o desgaste da ferramenta obtido com ar gelado é menor do que para o fluido convencional em baixos avanços e baixas velocidades de corte. Em baixos avanços, o efeito refrigerante do ar gelado é mais evidente e leva a menores taxas de desgaste da ferramenta.

O ar gelado tem como principal característica remover calor, no entanto segundo Naumov et al. (2006), ar gelado umidificado é obtido em condições específicas de operação do tubo de vórtice. Assim além do aspecto refrigerante, o ar gelado com micro/nano doses de água atua como agente lubrificante pela formação de um filme de óxido na região de contato entre ferramenta e peça. Este fenômeno pode contribuir para a melhora do acabamento superficial da peça.

Da Silva et al. (2011) realizaram um estudo comparativo da influência de dois ambientes de usinagem no desgaste da ferramenta e na qualidade da superfície do aço AISI 1047 após o fresamento com insertos de metal duro revestidos. Para a usinagem úmida, empregaram três métodos de aplicação do fluido: inundação (fluido em abundância), taxa de fluxo reduzida e MQL (mínima quantidade de lubrificante). O estudo de Da Silva et al. (2011) é importante pelo fato de proporcionar a visão de que a eficiência da lubri-refrigeração da região de corte não é função da quantidade de fluido empregado, mas sim da capacidade de remoção de calor e lubrificação da interface ferramenta-peça.

Através da pesquisa realizada, entende-se que os ganhos proporcionados pela aplicação do ar gelado como agente lubri-refrigerante são fruto de uma combinação de fatores, a citar: parâmetros de corte, material e geometria da ferramenta, material da peça, características construtivas e de operação do sistema de entrega do fluido e características da máquina ferramenta. O escopo deste trabalho contempla a investigação do ar gelado aplicado como agente refrigerante para reduzir o desgaste da ferramenta no processo de torneamento.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Diante do objetivo de verificar e quantificar a redução do desgaste da ferramenta que o sistema de refrigeração por ar gelado pode proporcionar no processo de usinagem por torneamento, a presente sessão descreve os materiais e métodos e o planejamento experimental seguidos nos ensaios de torneamento.

### 2.1 Materiais e métodos

Para o corte de material utilizou-se o inserto TNMG160408-M5 classe P4-P5, TP2501 e o suporte porta ferramentas ID 3G – MTINR 2020 K16. Na seleção dos parâmetros de corte levou-se em consideração a limitação da velocidade de rotação da máquina (4000 rpm) e a tecnologia proposta no escopo de trabalho. A Figura 1 apresentam-se os apresenta o aparato experimental utilizado nos ensaios e a Tabela 1 os parâmetros de corte adotados.

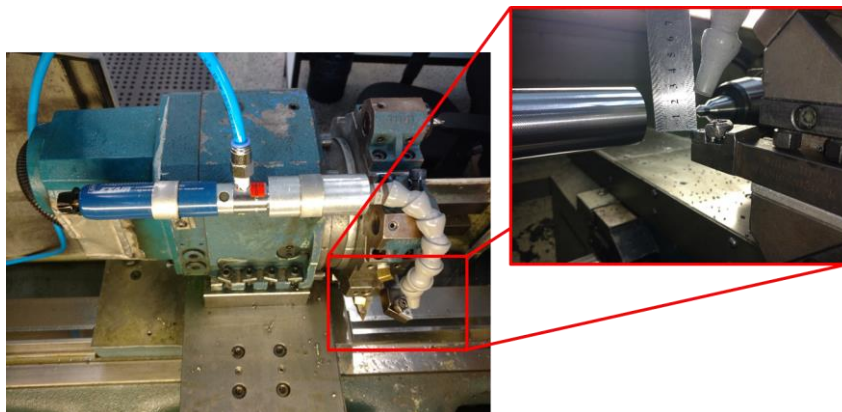


Figura 1. Aparato experimental dos ensaios de torneamento.

Tabela 1. Parâmetros de corte selecionados para os ensaios de torneamento.

Ensaio	$a_p$ [mm]	$V_c$ [m/min]	$f$ [mm/rot]	Incremento nos parâmetros de corte
1	1	275	0,19	-
2	1	375	0,19	36,4% na $V_c$

Visto que o objetivo do estudo é quantificar a eficiência da refrigeração da ferramenta pelo sistema de tubo vórtice, com base na pesquisa realizada em literatura especializada, definiu-se a hipótese de que o uso de ar gelado como agente refrigerante prolonga a vida da ferramenta.

Para a 1ª fase foi realizado o torneamento longitudinal do material com o intuito de comparar os sistemas de refrigeração: ar gelado x fluido refrigerante líquido utilizando o conjunto de parâmetros 1 da Tabela 1. A condição de parada do ensaio fase 1 é o desgaste de flanco máximo de 0,3 mm.

Para a 2ª fase: torneamento longitudinal do material com velocidade de corte aumentada para 375 m/min, um ensaio para cada condição de refrigeração da ferramenta. O aumento da velocidade de corte para a fase 2 justifica-se pelo fato de a temperatura excessiva na região de corte ser uma das principais causas do desgaste da ferramenta. Não foram realizadas repetições para nenhuma das condições ensaiadas.

Foram utilizados corpos de prova (CPs) de aço SAE 4340 com as seguintes dimensões: diâmetro 86mm x 120mm, sendo a região útil de 85mm diâmetro por 100mm de comprimento. Na Tabela 2 estão descritas as características da máquina utilizada nos ensaios.

Tabela 2. Dados de máquina usada nos ensaios.

Máquina	Torno CNC Romi Centur 30D
Faixa de velocidade [rpm]	4 a 4000
Potência: motor principal [cv/kW]	12,5/9
Potência total instalada [kVA]	15
Avanço máximo X/Z [m/min]	10/10

## 2.2 Análises Preliminares

Visto que a temperatura na saída do tubo de vórtice é função da pressão e vazão do ar comprimido, realizaram-se testes preliminares para identificar as características de funcionamento do sistema de refrigeração por tubo de vórtice.

Para os testes preliminares utilizou-se uma mangueira de ar comprimido de 10mm diâmetro. Mediu-se a temperatura na saída do bico para diferentes pressões e vazões (regulada pela válvula do tubo de vórtice) de ar na entrada do sistema. O termômetro utilizado na medição da temperatura foi o FLUKE 51II da THERMOMETER. Os valores de temperatura foram registrados no momento em que o termômetro entrava em regime estacionário. A Tabela 3 apresenta os resultados do teste preliminar.

Tabela 3. Análise da variação da temperatura na saída do bico em função da pressão e da vazão de ar na entrada do sistema *cold gun air system*.

Pressão [bar]	Estado da válvula			
	Fechada	2 voltas aberta	4 voltas aberta	Totalmente aberta
	Temperatura [°C]			
3	22,2	2,9	1,8	17,5
4	20,5	-0,2	-2,2	11,5
5	20,3	-2,7	-7,2	-4,0
6	19,8	-4,0	-11,2	-12,0
7	19,4	-5,8	-15,0	-18,2
8	18,8	-6,7	-18,8	-22,2

Em função da maioria das linhas de ar comprimido das empresas trabalharem com uma pressão disponível/estável de 6 bar, utilizou-se como parâmetros de operação do sistema de vórtice a válvula totalmente aberta e fornecimento de ar com mangueira de 10mm de diâmetro à pressão de 6 bar. A temperatura na saída do bico para esta condição de operação é de aproximadamente -12°C.

## 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Avaliou-se a influência do agente refrigerante no ensaio de torneamento através da medição do desgaste da ferramenta em função do tempo de corte. O bico de ar gelado foi posicionado na parte superior da ferramenta, mantido a aproximadamente 25mm da mesma com o jato de ar direcionado para a região de corte (Figura 1).

### 3.1 1ª Fase

A Figura 2 apresenta a curva de vida da ferramenta para o primeiro conjunto de parâmetros, em que a taxa de remoção de material foi de  $5,2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{min}$ . Observou-se que, para o mesmo nível de desgaste de flanco, a ferramenta refrigerada com ar gelado teve uma durabilidade aproximadamente 25% maior tanto para os gumes de corte principal e secundário comparada com a ferramenta refrigerada com fluido convencional.

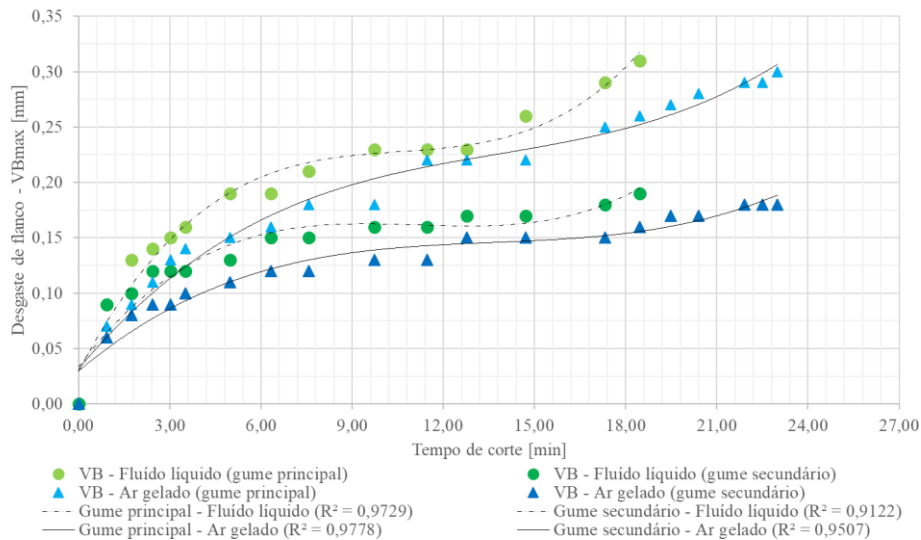


Figura 2. Ensaio de torneamento para análise da influência do tipo de refrigeração na vida de ferramenta:  $V_c = 275 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,19 \text{ mm/rot}$  e  $a_p = 1 \text{ mm}$ .

### 3.2 2ª Fase

A eficiência do sistema de arrefecimento da ferramenta está diretamente ligada à sua capacidade de remoção de calor. Nessa segunda etapa, avaliou-se o desempenho do sistema de refrigeração por ar frio uma condição mais severa, na qual teoricamente o fluido líquido teria um desempenho melhor. Nessa nova condição a taxa de remoção foi de  $7,1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{min}$ .

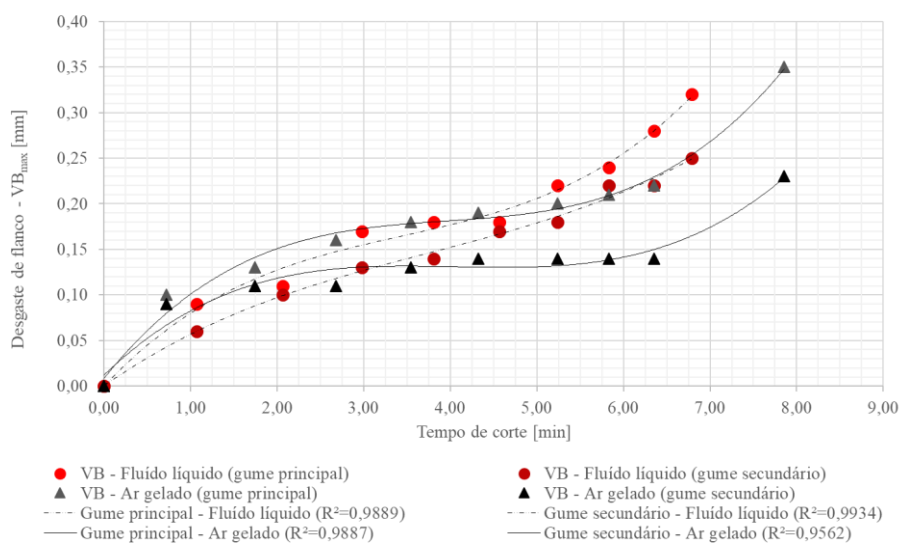


Figura 3. Ensaio de torneamento para análise da influência do tipo de refrigeração na vida de ferramenta:  $V_c = 375 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,19 \text{ mm/rot}$  e  $a_p = 1 \text{ mm}$ .

O acompanhamento da evolução do desgaste é complementado na Figura 4. Na ferramenta refrigerada com fluido líquido, o gume de corte sofre desgaste desuniforme com o aumento do tempo de corte. Para ferramenta refrigerada com ar gelado, ocorre a formação de aresta postiça.

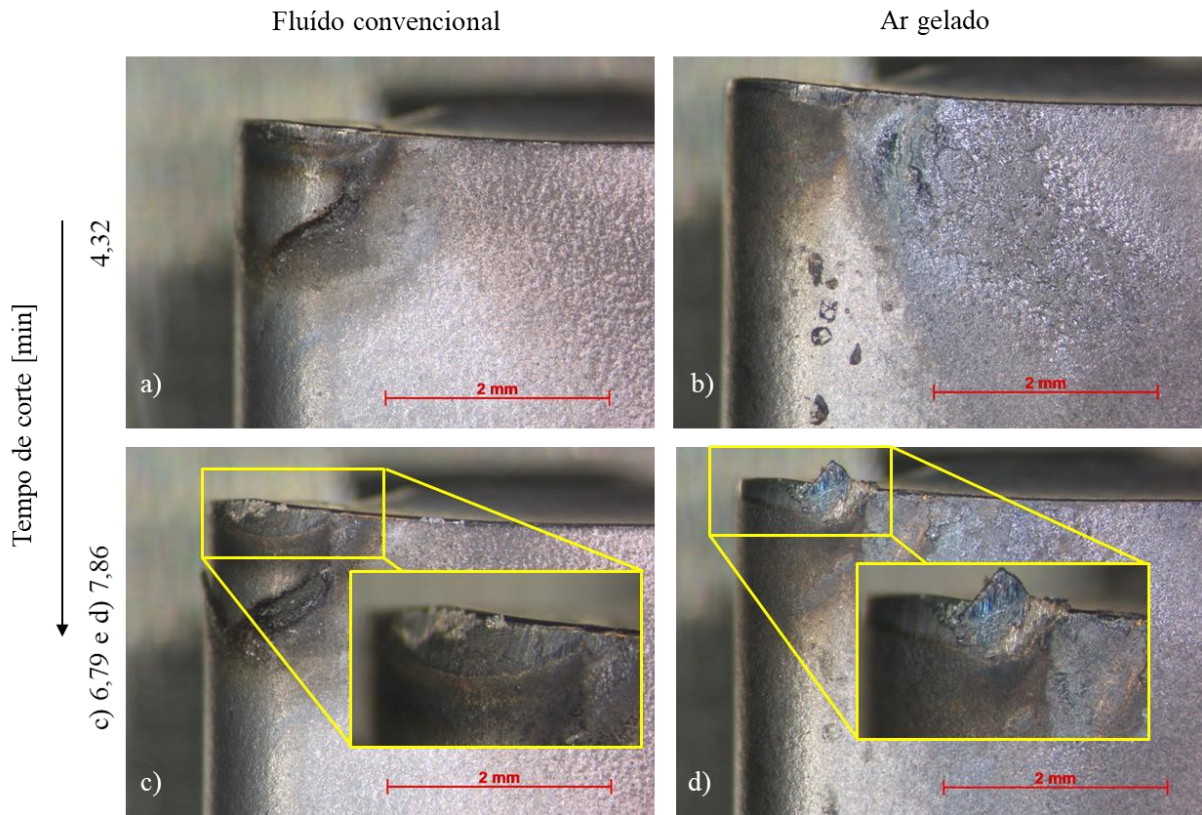


Figura 4. Desgaste de Flanco no gume principal

Pode-se observar em a) refrigeração por fluido líquido e b) refrigeração por ar gelado - 4,32 min de usinagem, c) refrigeração por fluido líquido - 6,79 min de usinagem e d) refrigeração por ar gelado - 7,86 min de usinagem.

#### 4. CONCLUSÃO

Diante do objetivo de avaliar e quantificar a eficiência do sistema de refrigeração por tubo de vórtice, um ensaio de comparativo entre fluido convencional (líquido) e ar gelado foi proposto para comparar meios de refrigeração da ferramenta na operação de torneamento, onde a aplicação do ar gelado, apresentou bons resultados.

No torneamento do material aço SAE 4340, para configuração de operação adotada para o sistema de tubo de vórtice e para os parâmetros velocidade de corte de 275 m/min, avanço por volta de 0,19 mm/rot e profundidade de corte de 1 mm a ferramenta teve durabilidade de cerca de 25% maior com a aplicação do ar gelado como agente refrigerante. O tempo de corte total, considerando  $VB_{max}$  de 0,3 mm foi 23 minutos para a ferramenta arrefecida com ar frio e 18,45 minutos para o fluido líquido.

O incremento de 36,4% na velocidade de corte para o segundo ensaio, reduziu drasticamente a vida da ferramenta para ambos os sistemas de refrigeração avaliados, o que já era esperado. A redução estimada foi de aproximadamente 63% para o fluido e 65% para o ar gelado.

Comparando as curvas de vida da ferramenta do segundo ensaio, o tempo de corte para o torneamento com fluido líquido e ar gelado foi respectivamente 6,79 e 7,86 minutos, logo a durabilidade da ferramenta arrefecida utilizando o sistema de tubo de vórtice permaneceu maior em aproximadamente 12,3%.

Diante dos resultados obtidos, para as condições especificadas comprovou-se a eficiência da refrigeração por ar gelado e atendeu-se os seguintes fatores motivadores do escopo deste trabalho: Redução dos gastos com compra de fluido de corte/lubri-refrigerante, evitar a falha da ferramenta por choque térmico, aumento em ganho de ferramenta por desgaste.

Outros dois pontos positivos da utilização do ar gelado podem ser levados em consideração, visto que sua utilização pode contribuir para a redução dos danos ao meio ambiente pela ausência de resíduos e também pelo fato de contribuir para a manutenção da saúde do operador de máquina.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser por ceder a infraestrutura para realização dos ensaios de torneamento e a empresa Widecoat por fornecer o tubo de vórtice (*Cold Gun Air System*).

## 6. REFERÊNCIAS

- Da Silva, R. B. et al. Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems. *Wear*, v. 271, n. 9-10, p. 2459-2465, 2011.
- Liu, Jie; Chou, Y. Kevin. On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al-Si alloys with vortex-tube cooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, n. 3-4, p. 635-645, 2007.
- Naumov, Alexander et al. System of High-performance Cutting with Enhanced Combined Effect of Cooling and Lubrication Medium Based on Ranque-hilsch Effect. *Procedia CIRP*, v. 57, p. 457-460, 2016.
- Rahman, M. et al. Effect of chilled air on machining performance in end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 21, n. 10-11, p. 787-795, 2003.
- Rubio, E. M. et al. Cooling systems based on cold compressed air: a review of the applications in machining processes. *Procedia engineering*, v. 132, p. 413-418, 2015.
- Sankar, M. Ravi; Choudhury, S. K. Experimental Study and Modeling of Machining with Dry Compressed Air, Flood and Minimum Quantity Cutting Fluid Cooling Techniques. *Procedia CIRP*, v. 31, p. 228-233, 2015.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

# EVALUATION OF COLD AIR COOLING IN THE TURNING PROCESS

**Saulo Melotti**

**Rodrigo Keller**

**Ariel Paulo Rezende**

SENAI Inovation Institute in Manufacturing Systems and Laser Processing – Rua Arno Waldemar Dohler, 308 - Santo Antônio 89.218-153 - Joinville – SC  
saulo.melotti@sc.senai.br  
rodrigo.keller@sc.senai.br  
ariel.rezende@sc.senai.br

**Jean Pierre Sauron**

Widecoat - Rua Cel. Francisco Inácio, 215 - Vila Moinho Velho, São Paulo/SP  
desenvolvimento@widecoat.com.br

**Abstract:** *In machining processes, cutting of material results in heating of the tool / part and the removal of heat is generally accomplished by the application of lubricant-cooling agents. As an alternative to the conventional cooling method (flood coolants), the cold air is an option that provides reduction in wear and also in the failure of the tool by thermal shock during interrupted cutting. Another important advantage is the environmental appeal, since there is no need for fluid disposal. This paper presents a comparison between the performance of the cold air generated with vortex tube and the flood coolant in the minimization of the wear of the tool during the cutting of SAE 4340 steel by the turning process. As a result, approximately 25% greater durability in the life of the chilled air cooled tool was observed for the set of chopping parameters and configuration of the chilled air system adopted.*

**Key-words:** *Turning. Cold air coolant. Vortex tube. Tool life.*

## RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the oriented material included in this paper.