

Determinação numérico experimental do coeficiente de convecção do fluido de corte aplicado ao processo de furação

Abordagem híbrida utilizando software Open Source

Douglas Wellington Pontes
Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC
Joinville, Brasil

Joel Martins Crichigno Filho
Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC
Joinville, Brasil
Paulo Sérgio Berving Zdanski
Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC
Joinville, Brasil

Resumo—A proposta deste trabalho é encontrar o coeficiente de convecção médio do fluido de corte (h_{fluido}) utilizado no processo de usinagem por furação. Para isto serão realizados alguns experimentos utilizando aparato experimental específico para este fim. O método utilizado para encontrar o coeficiente é uma abordagem numérica experimental na qual algumas condições de corte serão simuladas experimentalmente, os dados resultantes do experimento serão utilizados como condição de contorno para o modelo numérico. Esse modelo numérico compreenderá apenas o domínio sólido, ou seja, a broca, o fluido não será resolvido. Após o modelo numérico ser resolvido utilizando *software* de código aberto, o coeficiente de convecção será obtido, através de uma equação simples, para a condição experimental escolhida. Alguns parâmetros de corte serão variados para verificar sua influência sobre o valor do h_{fluido} .

Palavras-chave—fluido de corte; coeficiente de convecção; furação; numérico-experimental; software de código aberto;

I. INTRODUÇÃO

De um modo geral os processos de usinagem geram uma grande quantidade de calor, de fato as temperaturas que são geradas na ponta da ferramenta são próximas a 900 (°C) [1]–[5], essas altas temperaturas ocasionam a diminuição da vida útil da ferramenta [1].

A partir disso um elemento importante usado para diminuir as temperaturas durante a usinagem é o uso do fluido de corte. Ele pode ser aplicado de duas maneiras: em abundância [6], que seria o modo tradicional de utilização ou ainda pulverizado [7]. Para ambos os modos o fluido de corte não penetra na interface na ponta da ferramenta, região esta onde se encontram as temperaturas mais elevadas. Sabe-se apenas que eles entram na interface de corte apenas até certo ponto [7].

A aplicação do fluido de corte em abundância é largamente utilizado na indústria devido a sua facilidade de implementação. Ela consiste em aplicar o fluido sobre o conjunto peça-ferramenta sem muito controle sobre a sua vazão. Embora a aplicação do fluido de corte por baixo da ferramenta apresente

melhores resultados [1] ela não é implementada na prática devido a características construtivas mais complexas.

Já o método de pulverização também chamado de (MQL-Mínima Quantidade de Fluido de Corte), consiste em pulverizar o fluido de corte em conjunto com uma grande quantidade de gás, resultando em uma excepcional economia de fluido. Esse método não tem nenhuma grande desvantagem com relação ao método tradicional [8] e possui ainda pouca sensibilidade a quantidade do fluido pulverizado [9]. Vários fluidos de corte podem ser utilizados, porém alguns se tornam mais vantajosos que outros se combinados com determinados tipos de atmosferas, como é o caso dos ésteres que tem sua capacidade de refrigeração melhorada com atmosferas a base de oxigênio na usinagem de aços [10]. Todavia dependendo do processo notam-se características distintas na aplicação do MQL, para o caso de furações, por exemplo, a carga térmica na ferramenta aumenta levemente [12] já na furação profunda o tempo de usinagem influencia na carga térmica [11].

Do ponto de vista industrial os fatores mais importantes da aplicação do fluido de corte são: o custo, danos ao meio ambiente e danos a saúde de quem os utiliza. Deste modo a utilização de pouco fluido de corte é extremamente positiva, estima-se que em torno de 17% do custo da usinagem é devido ao fluido de corte enquanto que apenas 2% a 4% é devido a ferramenta. Um indicativo de sustentabilidade na usinagem é o uso da menor quantidade de fluido de corte possível [13].

Deste modo fica cada vez mais evidente que saber corretamente a quantidade de fluido de corte a se utilizar, principalmente nos processos tradicionais onde o uso do MQL ainda é inviável, só trás benefícios. Uma maneira de se quantizar corretamente o fluido de corte, sem comprometer a vida útil da ferramenta devido as altas temperaturas, é descobrir o valor correto do seu coeficiente de convecção. Com esse valor pode-se então aplicar apenas a quantidade necessária de fluido para reduzir as temperaturas geradas em uma determinada

condição de corte. Esse valor pode ser encontrado de três maneiras distintas: por método puramente experimental [14], por método puramente numérico [15] e por métodos híbridos [16]–[22] que são uma combinação dos dois primeiros. Para este trabalho será utilizado o método híbrido em conjunto com um aparato experimental que simula algumas condições de corte pré-estabelecidas para o processo de furação. A partir dos experimentos com o aparato, serão obtidas duas condições de contorno, uma de calor e outra de temperatura, que farão parte da simulação com o objetivo de calcular a temperatura média da superfície da broca onde escoo o fluido de corte. Esse aparato experimental possui uma biqueira rotativa com o intuito de reproduzir o efeito da rotação durante o processo de furação, já que por motivos de instrumentação a broca não pode girar durante os experimentos. Com essa temperatura, e mais alguns outros parâmetros experimentais determinados, será possível calcular o coeficiente de convecção para a condição de corte experimental escolhida.

II. MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONVECÇÃO DO FLUÍDO DE CORTE NA USINAGEM POR FURAÇÃO

A. Problema e formulação matemática

O processo de furação pode ser caracterizado conforme é mostrado na Fig 1 durante o processo de furação, ela pode ser dividida em quatro regiões distintas cada uma com seu devido comprimento característico que são: $R1$, com o comprimento $C_{Profundidade}$, é a região onde é gerado o calor durante o processo de usinagem; $R2$, com o comprimento C_{Fluido} , é a região onde há interação com o fluido de corte; $R3$, com o comprimento C_{Ar} , é a região onde há interação com o ar e $R4$, com o comprimento característico $C_{Pinça}$, é o trecho da broca que é segurado pela pinça da máquina. Durante a usinagem, a profundidade de corte $C_{Profundidade}$ aumenta até chegar a um valor desejado. A soma dos comprimentos característicos resulta no comprimento total da broca L_{broca} . O fluido de corte que está em contato tanto com a região $R2$ quanto com as regiões $Rp1$ é fornecido por uma biqueira e acaba retirando calor de ambas as superfícies.

O processo de troca térmica pode ser modelado conforme mostra a Fig. 2. Na região $R1$, a maior parcela de calor gerado vem de $Q_{ger(U)}$ que é o calor gerado nas zonas primárias e secundárias devido ao processo de usinagem, e $Q_{ger(A)}$ que é o calor gerado pelo atrito da broca com a superfície já usinada. Além disso como o comprimento $C_{Profundidade}$ aumenta conforme a broca penetra na peça o valor de $Q_{ger(A)}$ também aumenta. Essas duas parcelas são responsáveis pelo aquecimento da broca durante o processo. Esses calores acabam sendo transferidos por condução tanto para a broca quanto para a peça, o balanço de energia em $R1$ resulta em uma parcela de calor $Q_{(broca)}$ que será conduzida para o restante da broca.

Dentro da peça o calor gerado em $R1$ é dissipado de três maneiras distintas: por condução para a mesa $Q_{(peça-mesa)}$, por convecção natural para o ar $Q_{(peça-ar)}$ e por convecção

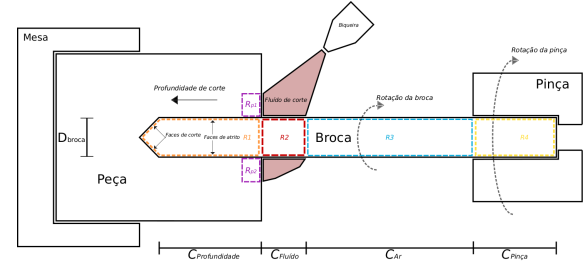


Figura 1. Vista em corte do processo de furação.

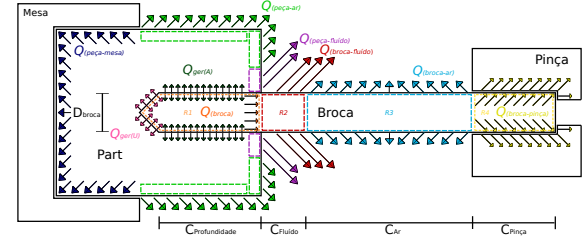


Figura 2. Modelagem da troca térmica no processo de furação.

forçada para o fluido refrigerante $Q_{(peça-fluido)}$. Essas parcelas de calor são pequenas pois a maior parte do calor vai para o cavaco [24].

Já a região $R2$ é marcada pela interação com o fluido de corte, e espera-se que a maior parte do calor $Q_{(broca)}$ seja dissipada por essa interação na forma de $Q_{(broca-fluido)}$. O restante do calor passa para a região $R3$ e $R4$ onde são dissipados respectivamente por convecção com o ar na forma de $Q_{(broca-ar)}$ e por condução para a pinça na forma de $Q_{(broca-pinça)}$. Espera-se que pouca quantidade de calor chegue até a região $R4$.

Deste modo, observa-se na prática que as regiões da broca que dissipam mais calor são as $R2$ e $R3$. A interação do fluido de corte com a superfície $R2$ produz um coeficiente médio de convecção forçada $\bar{h}_{fluido}$, estimar o valor de $\bar{h}_{fluido}$ é justamente o objetivo deste artigo.

Para que $\bar{h}_{fluido}$ seja estimado para algumas condições experimentais a Fig. 2 será simplificada a apenas dois volumes de controle de interesse, com a influência da pinça e da parte da broca exposta ao ar sendo descartadas. O resultado da simplificação são os volumes de controle $VC1$ que delimita a região $R2$ e $VC2$ que compreende as regiões $R3$ e $R4$ e podem ser vistos na Fig. 3.

O valor de $Q_{(VC1-VC2)}$ só existe durante o aquecimento da

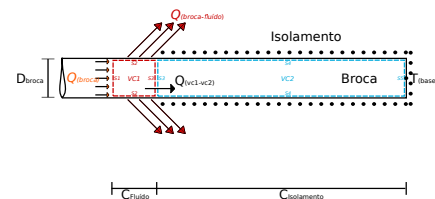


Figura 3. Problema simplificado.

broca e a temperatura $T_{(base)}$ é a mesma em toda a extensão do volume $VC2$ após o término do regime transiente devido ao isolamento. Com isso, descobrir o coeficiente de convecção do fluido de corte sobre a geometria complexa da broca ($\bar{h}_{fluido}$) resume-se ao problema da transferência de calor em sólido mostrado na Fig. 3.

O cálculo de $\bar{h}_{fluido}$ é feito através de (1).

$$\bar{h}_{fluido} = \frac{Q_{(broca-fluido)}}{A_{(broca-fluido)}(\bar{T}_{(broca-fluido)} - \bar{T}_{(fluido)})} \quad (1)$$

No qual $A_{(broca-fluido)}$ é a área da broca onde somente o fluido de corte retira calor, $\bar{T}_{(fluido)}$ é a temperatura média do fluido de corte medida durante o experimento, $Q_{(broca-fluido)} = Q_{(broca)}$ e será medida durante o experimento e $\bar{T}_{(broca-fluido)}$ é a temperatura média sobre a superfície da broca na região de contato com o fluido de corte.

A equação diferencial de governo (2) será utilizada para determinar o valor de $\bar{T}_{(broca-fluido)}$ numericamente.

$$\nabla \bullet k \nabla T = 0 \quad (2)$$

Essa equação será solucionada pelo *software OpenFoam* segundo a técnica de volumes finitos aplicada a uma malha tetraédrica, o trecho da broca que será resolvido é delimitado pelo volume de controle $VC1$ e é mostrado na Fig. 4.

As condições de contorno para essa equação são:

- Para a superfície por onde o calor entra na broca:

$$A_{S1} k \frac{\partial T}{\partial S} \Big|_{S=S1} = Q_{(broca)} \quad (3)$$

- Para a superfície por onde o calor sai da broca para o fluido de corte:

$$A_{S2} k \frac{\partial T}{\partial S} \Big|_{S=S2} = -Q_{(broca)} \quad (4)$$

- Temperatura prescrita:

$$T \Big|_{S=S3} = T_{(base)} \quad (5)$$

Onde k é a constante de transferência de calor por condução do material da broca, A_{S1} é a área da secção transversal da broca e A_{S2} é área de contato do fluido de corte com a broca.

O procedimento numérico-experimental (híbrido) consiste na seguinte sequência:

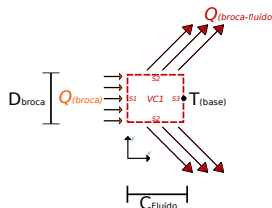


Figura 4. Volume de controle e condições de contorno que delimitam o trecho da broca que será simulado numericamente.

- 1) Modelar em CAD a região da broca delimitada pelo $VC1$ com sua geometria complexa;
- 2) Aferir os valores de $Q_{(broca)}$ e $T_{(base)}$ para algumas condições de corte experimentais ;
- 3) Com os dados obtidos nos itens 1) e 2), simular a geometria complexa da broca obtendo o valor de $\bar{T}_{(broca-fluido)}$;
- 4) Com $\bar{T}_{(broca-fluido)}$ obtido no item 3) resolver (1) obtendo o valor de $\bar{h}_{fluido}$;

B. Aparato experimental

A parte externa do aparato, vista na Fig. 5, consiste em um invólucro de cimento refratário no qual está alojado uma resistência elétrica de potência variável. Uma broca de diâmetro $D_{broca} = 0.020$ (m) e comprimento $L_{broca} = 0.205$ (m) atravessa o invólucro fazendo com que apenas o comprimento $L_{ext} = 0.100$ (m) fique para fora do invólucro. Do comprimento L_{ext} apenas uma pequena parte fica exposta ao fluido de corte, que é $C_{Fluido} = 0.010$ (m), enquanto o restante, $C_{Isolamento} = 0.090$ (m), fica isolado dentro de um compartimento com manta térmica.

Um sistema de refrigeração com uma biqueira rotativa é usado para lançar água sobre a superfície da broca que se encontra exposta próxima ao invólucro. Após a água escoar sobre esta superfície um tanque plástico capta a água fazendo com que ela volte ao sistema de bombeamento. O aparato é controlado por um painel elétrico cuja função principal é regular a tensão que é fornecida para a resistência, por meio de um tiristor e um potenciômetro, e a rotação da biqueira, por meio de um dimmer.

As informações importantes registradas durante o experimento na parte externa do invólucro são: a temperatura média do fluido de corte $\bar{T}_{(fluido)}$, a temperatura ambiente $T_{(amb)}$, a temperatura da base da broca $T_{(base)}$, a vazão do fluido de corte l_{Fluido} , a rotação da biqueira $R_{(biqueira)}$, e o comprimento C_{Fluido} , que é o comprimento responsável por delimitar a área da superfície da broca $A_{(broca-fluido)}$ e que será medida com a ajuda do *software CAD* no qual a broca foi modelada.

A parte interna do aparato, apresentada na Fig. 6, é formada por uma resistência elétrica, uma proteção de manta térmica ao redor de toda a resistência, um núcleo de aço *SAE 1020* cujo objetivo é transferir o calor gerado na resistência para a broca e por uma cola a base de silicone que faz o isolamento térmico e vedação contra água.

Para que o calor perdido pelo isolamento no interior do invólucro seja contabilizado corretamente as temperaturas frontal lateral interna (T_{FLii}), traseira interna (T_{Tii}), frontal externa (T_{Fei}), lateral externa (T_{Lei}), e traseira externa do isolamento (T_{Tei}) devem ser medidas durante o experimento. A temperatura (T_{FLii}) é medida estrategicamente na junção da parte frontal com a lateral interna do isolamento, e seu valor será usado para calcular tanto as perdas de calor frontais quanto laterais.

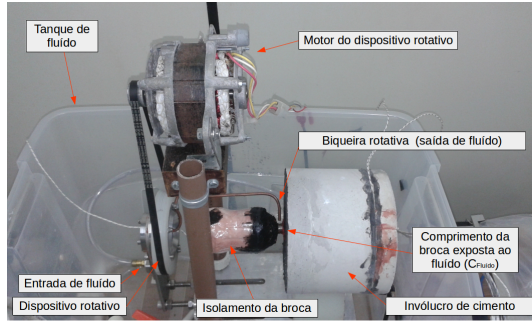


Figura 5. Foto da parte externa do aparato experimental com a descrição dos seus componentes.

Com esse aparato experimental a parcela de calor $Q_{(broca)}$, condição de contorno necessária para a simulação, é calculada por (6).

$$Q_{(broca)} = Q_{(resist)} - Q_{(front)} - Q_{(lat)} - Q_{(tras)} \quad (6)$$

Onde $Q_{(resist)}$ é o calor fornecido pela resistência durante o experimento, $Q_{(lat)}$ é o calor perdido pelas laterais do invólucro, $Q_{(front)}$ é o calor perdido pela parte frontal do invólucro e $Q_{(tras)}$ é o calor perdido pela parte traseira do invólucro. Essas quantidades de calor podem ser calculadas respectivamente por (7), (8), (9) e (10) [23].

$$Q_{(resist)} = Ui \quad (7)$$

$$Q_{(front)} = \frac{k_{isol} A_{(frontal)}}{E_{(frontal)}} (T_{FLii} - T_{Fei}) \quad (8)$$

$$Q_{(lat)} = \frac{2\pi k_{isol} L_{(lateral)}}{\left(\ln \frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)} (T_{FLii} - T_{Lei}) \quad (9)$$

$$Q_{(tras)} = \frac{k_{isol} A_{(traseira)}}{E_{(traseira)}} (T_{Tii} - T_{Tei}) \quad (10)$$

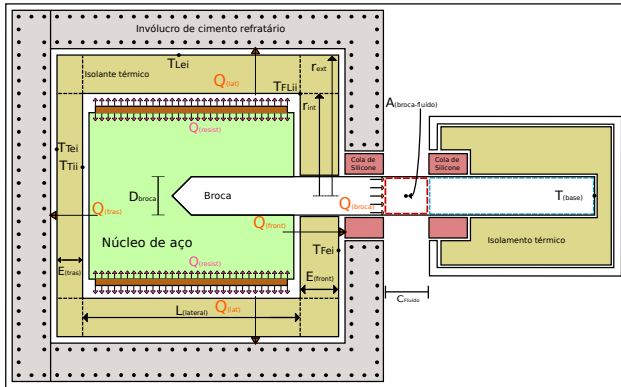


Figura 6. Disposição física em corte da parte interna do aparato experimental e do isolamento da parte final da broca.

No qual U e i são respectivamente a tensão e a corrente aplicadas na resistência durante o experimento, $E_{(frontal)}$ e $E_{(traseira)}$ são respectivamente as espessuras de isolamento frontal e traseira, $L_{(lateral)}$, r_{ext} e r_{int} são respectivamente o comprimento e os raios externo e interno do isolamento lateral. As áreas da superfície frontal $A_{(frontal)}$ e traseira $A_{(traseira)}$ do isolamento são calculadas por $A_{(frontal)} = \pi ((r_{int})^2 - (\frac{D_{broca}}{2})^2)$ e $A_{(traseira)} = \pi (r_{int})^2$. Os dados sobre o aparato experimental são: constante de condutividade térmica do isolamento (manta de fibra cerâmica de densidade $128 \text{ (kg/m}^3\text{)})$ $k_{isol} = 0.140 \text{ (W/mK)}$ [25], espessura frontal de isolamento $E_{(frontal)} = 0.033 \text{ (m)}$, espessura traseira de isolamento $E_{(traseira)} = 0.018 \text{ (m)}$, comprimento lateral de isolamento $L_{(lateral)} = 0.059 \text{ (m)}$, raio interno de isolamento $r_{int} = 0.042 \text{ (m)}$, raio externo de isolamento $r_{ext} = 0.075 \text{ (m)}$, diâmetro da broca $D_{broca} = 0.020 \text{ (m)}$, comprimento característico da região onde o fluido de corte atua $C_{Fluido} = 0.010 \text{ (m)}$, comprimento característico da região isolada $C_{Isolamento} = 0.090 \text{ (m)}$, área da secção transversal da broca $A_{S1} = 0.000132 \text{ (m}^2\text{)}$, área da superfície da broca onde o fluido de corte atua $A_{S2} = A_{(broca-fluido)} = 0.000734 \text{ (m}^2\text{)}$, potência máxima da resistência $P_{max} = 400 \text{ (W)}$, tensão e corrente usadas no experimento $U = 160.60 \text{ (V)}$ e $i = 1.12 \text{ (A)}$ gerando uma potência de $Q_{resist} = 179.87 \text{ (W)}$, as vazões de fluido de corte escolhidas são: $l_{Fluido} = 0.2 \text{ (L/min)}$, $l_{Fluido} = 0.30 \text{ (L/min)}$, $l_{Fluido} = 0.4 \text{ (L/min)}$ com as rotações escolhidas de: $R_{(biqueira)} = 345 \text{ (rpm)}$, $R_{(biqueira)} = 365 \text{ (rpm)}$, $R_{(biqueira)} = 385 \text{ (rpm)}$. Todos os termopares utilizados são do tipo K e o fluido de corte utilizado é a água.

C. Procedimento experimental

O experimento consiste em ajustar a tensão no painel de controle do aparato experimental, até que a potência atinja a estipulada para o experimento. A partir daí o experimento segue as seguintes etapas:

- Aquecimento: consiste no aquecimento do conjunto até que as temperaturas estabilizem, esse processo leva cerca de 5 (h) . Essa etapa é iniciada com o aparato estável a temperatura ambiente;
- Resfriamento: consiste no acionamento da bomba elétrica, regulada para a vazão escolhida, fazendo com que a área $A_{(broca-fluido)}$ passe a ser resfriada pelo fluido. Quando $T_{(base)}$ chega próximo de 80°C o motor da biqueira é acionado até que $T_{(base)}$ diminua e atinja uma temperatura estável. Esse processo demora cerca de 25 (min) para $R_{(biqueira)} = 345 \text{ (rpm)}$ e cerca de 15 (min) para $R_{(biqueira)} = 365$ e 385 (rpm) ;
- Estabilidade: Nesta etapa são gravadas todas as temperaturas medidas no experimento por um período de 5 (min) para se obter uma média no tempo destes valores;

D. Análise numérica

O modelo completo CAD da broca foi feito na plataforma OnShape e segue o formato padrão original da broca utilizada no experimento. Após a etapa de modelagem a broca é

exportada em IGES para o *software Salome* que aplicará uma malha de volumes finitos tetraédrica. Essa malha é feita com a ajuda do gerador de malha incorporado no *Salome* chamado *NETgen* e possui malha com 1513 nós e 5104 volumes, cujas superfícies que receberão as condições de contorno são mostradas na Fig. 7. Após a malha ser feita o *Salome* a exporta em formato *UNV* para o *software OpenFoam*.

O *openFoam*, que é o software baseado em volumes finitos, utiliza o solver *laplacianFoam* para resolver (2) e obter a distribuição de temperaturas na broca.

As condições de contorno utilizadas nesse caso são de fluxos de calor e temperaturas nas devidas superfícies. Em seguida a simulação é executada. Os resultados obtidos serão analisados com a ajuda do *software* de visualização *ParaView*. A temperatura média sobre a superfície da broca onde o fluido atua ($\bar{T}_{(broca-fluido)}$) será obtida pela integração numérica do gradiente de temperaturas sobre essa superfície e dividindo o resultado pela sua área. Os *softwares*: *Salome*, *OpenFoam* e *ParaView* são *open source*, enquanto que o *software* de CAD *OnShape* é *free* se o modelo for de domínio público.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Resultados experimentais

Os resultados das temperaturas obtidas no experimento e das perdas de calor calculadas através de (9), (8) e (10) podem ser vistos respectivamente nas Tabelas I e II.

Com esses resultados pode-se notar que as temperaturas $\bar{T}_{(fluido)}$ e $T_{(amb)}$ permanecem relativamente estáveis, e que apesar do demais valores de temperatura variarem um pouco durante os experimentos o valor de $Q_{(broca)}$ é praticamente o mesmo para todas as condições de corte implementadas. Já os valores de $T_{(base)}$ estabilizam, no caso mais extremo $l_{Fluido} = 0.40$ (L/min) e $R_{(biqueira)} = 385$ (rpm), a cerca de 16 (°C) a cima da temperatura $\bar{T}_{(fluido)}$, o que é bom pois fica fora da tolerância de ± 1 (°C) do termopar, além disso isso indica que vazões maiores que $l_{Fluido} = 0.40$ (L/min) podem ser implementadas antes dessa tolerância ser atinjida.

B. Resultados numéricos

Após obtidos os resultados experimentais que delimitam as condições de contorno $Q_{(broca)}$ e $T_{(base)}$, parte-se para a etapa de simulação com o intuito de calcular $\bar{T}_{(broca-fluido)}$. O perfil de temperatura sobre a superfície da broca, resultante das simulações são mostrados nas Figs. 8, 9 e 10. As temperaturas

médias $\bar{T}_{(broca-fluido)}$ calculadas sobre as superfícies das Figs. 8, 9 e 10 e os valores finais de $\bar{h}_{(fluido)}$ calculadas por (1) são mostradas na Tabela III.

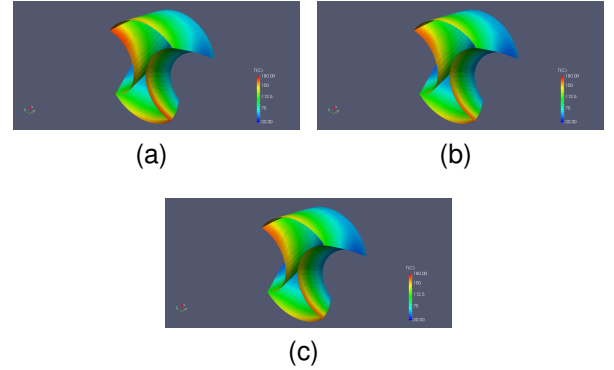


Figura 8. Resultados das simulações para $l_{Fluido} = 0.20$ (L/min). Sendo que: Fig. 8a mostra o resultado para $R_{(biqueira)} = 345$ (rpm), a Fig. 8b mostra o resultado para $R_{(biqueira)} = 365$ (rpm) e a Fig. 8c mostra o resultado para $R_{(biqueira)} = 385$ (rpm)

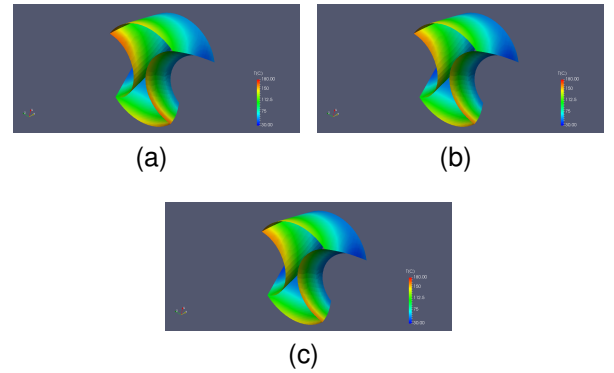


Figura 9. Resultados das simulações para $l_{Fluido} = 0.25$ (L/min). Sendo que: Fig. 9a mostra o resultado para $R_{(biqueira)} = 345$ (rpm), a Fig. 9b mostra o resultado para $R_{(biqueira)} = 365$ (rpm) e a Fig. 9c mostra o resultado para $R_{(biqueira)} = 385$ (rpm)

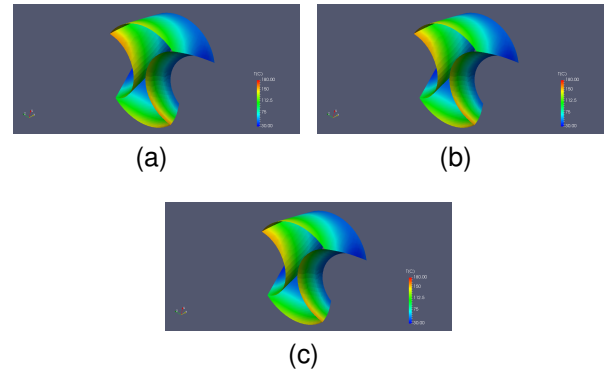


Figura 10. Resultados das simulações para $l_{Fluido} = 0.30$ (L/min). Sendo que: Fig. 10a mostra o resultado para $R_{(biqueira)} = 345$ (rpm), a Fig. 10b mostra o resultado para $R_{(biqueira)} = 365$ (rpm) e a Fig. 10c mostra o resultado para $R_{(biqueira)} = 385$ (rpm)

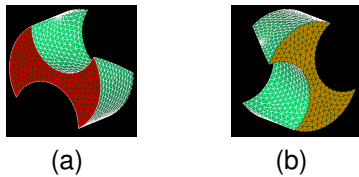


Figura 7. Malha tetraédrica da broca. Na Fig. 7a é mostrado em vermelho a parte da malha que receberá a condição de contorno $Q_{(broca)}$, em verde a que receberá a condição $-Q_{(broca)}$ e na Fig. 7a é mostrado em amarelo a parte da malha que receberá a condição de contorno $T_{(base)}$

Tabela I
TEMPERATURAS MEDIAS DOS EXPERIMENTOS

Temperaturas	Experimentos								
	$l_{Fluido} = 0.20 \text{ (L/min)}$			$l_{Fluido} = 0.30 \text{ (L/min)}$			$l_{Fluido} = 0.40 \text{ (L/min)}$		
	$R_{(biqueira)} \text{ (rpm)}$			$R_{(biqueira)} \text{ (rpm)}$			$R_{(biqueira)} \text{ (rpm)}$		
	345	365	385	345	365	385	345	365	385
$T_{FLii} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	660.88	659.92	661.67	666.27	670.93	672.93	670.99	667.98	677.74
$T_{Tii} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	649.75	649.47	651.19	655.89	661.12	663.49	661.27	658.42	669.58
$T_{Fei} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	111.98	102.07	100.49	109.04	109.58	109.16	103.46	101.11	100.71
$T_{Lei} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	189.35	188.01	187.62	188.51	189.07	190.05	190.54	189.13	189.98
$T_{Tei} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	404.01	401.99	401.99	405.31	407.90	410.62	410.71	408.51	411.06
$T_{(base)} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	61.09	56.64	56.99	54.71	51.18	50.56	47.86	46.66	46.44
$\bar{T}_{(fluido)} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	29.08	29.68	29.97	30.27	30.31	30.23	30.28	30.22	30.16
$T_{(amb)} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	26.02	26.17	26.30	26.26	26.18	26.04	26.03	25.99	25.90

Tabela II
CALORES CALCULADOS NOS EXPERIMENTOS

Calores	Experimentos								
	$l_{Fluido} = 0.20 \text{ (L/min)}$			$l_{Fluido} = 0.30 \text{ (L/min)}$			$l_{Fluido} = 0.40 \text{ (L/min)}$		
	$R_{(biqueira)} \text{ (rpm)}$			$R_{(biqueira)} \text{ (rpm)}$			$R_{(biqueira)} \text{ (rpm)}$		
	345	365	385	345	365	385	345	365	385
$Q_{(front)} \text{ (W)}$	12.17	12.37	12.45	12.36	12.45	12.50	12.59	12.57	12.80
$Q_{(lat)} \text{ (W)}$	42.21	42.24	42.43	42.76	43.13	43.22	43.00	42.86	43.66
$Q_{(tras)} \text{ (W)}$	10.59	10.67	10.74	10.80	10.91	10.90	10.80	10.77	11.14
$Q_{(broca)} \text{ (W)}$	114.90	114.59	114.25	113.95	113.38	113.25	113.48	113.67	112.27

Tabela III
RESULTADOS DE $\bar{T}_{(broca-fluido)}$ E $\bar{h}_{fluido}$.

Resultados médios	Experimentos								
	$l_{Fluido} = 0.20 \text{ (L/min)}$			$l_{Fluido} = 0.30 \text{ (L/min)}$			$l_{Fluido} = 0.40 \text{ (L/min)}$		
	$R_{(biqueira)} \text{ (rpm)}$			$R_{(biqueira)} \text{ (rpm)}$			$R_{(biqueira)} \text{ (rpm)}$		
	345	365	385	345	365	385	345	365	385
$\bar{T}_{(broca-fluido)} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	92.85	88.31	88.57	86.21	82.52	81.86	79.29	78.08	77.47
$\bar{h}_{fluido} \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$	2454.76	2662.82	2656.25	2775.19	2958.53	2988.34	3154.58	3235.68	3233.15

Os perfis de temperatura sobre a superfície da broca mostrados nas Figs. 8, 9 e 10, são bem irregulares. As temperaturas máximas são registradas ao longo da aresta que delimita a intersecção entre a superfície de entrada de calor (A_{S1}) e a superfície onde o fluido de corte atua (A_{S2}), como era o esperado, porém elas não se mantem constantes ao longo dessa aresta possuindo os maiores valores nos vértices superior esquerdo e inferior direito. Essas variações nas temperaturas são ocasionadas devido a geometria complexa da broca.

No geral, com a variação das vazões há uma variação considerável nas temperaturas da superfície da broca, vazões maiores proporcionaram temperaturas menores o inverso também é verdadeiro. Porém o mesmo não pode ser dito sobre a influência da variação da rotação no perfil de temperaturas, apresentando uma pequena influência apenas para a primeira rotação de cada vazão escolhida. Apesar da pequena variação da rotação durante os experimentos, a rotação acaba influenciando muito pouco no perfil de temperaturas da superfície da

broca.

As médias de temperaturas calculadas tem uma tendência a serem maiores para as primeiras rotações de cada vazão escolhida e mais próximas umas das outras para a segunda e terceira rotações. Isso já era esperado, pois o comportamento das temperaturas médias deve seguir o comportamento apresentado no perfil de temperaturas. A diferença entre a primeira e segunda rotação de cada vazão também muda, para a vazão de $l_{Fluido} = 0.20 \text{ (L/min)}$ a diferença entre a primeira e a segunda rotações é de cerca de $\approx 5 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$, para a segunda vazão de $l_{Fluido} = 0.30 \text{ (L/min)}$ a diferença entre a primeira e a segunda rotações é de cerca de $\approx 3 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$ e para a última vazão de $l_{Fluido} = 0.40 \text{ (L/min)}$ a diferença entre a primeira e a segunda rotações é de cerca de $\approx 2 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$.

Os coeficientes médios de convecção do fluido ($\bar{h}_{fluido}$) em função da rotação da biqueira ($R_{(biqueira)}$) podem ser vistos no gráfico da Fig. 11. Os valores de $\bar{h}_{fluido}$ aumentam consideravelmente da primeira rotação ($R_{(biqueira)} = 345 \text{ (rpm)}$)

IV. CONCLUSÃO

De um modo geral as constatações sobre os resultados obtidos foram:

- As temperaturas dentro do invólucro mudaram muito pouco durante os experimentos com a quantidade de calor que entra na broca ($Q_{(broca)}$) permanecendo praticamente constante;
- Apesar dos experimentos terem sido feitos com uma vazão de até $l_{Fluido} = 0.40$ (L/min) constatou-se que esta não é a vazão máxima suportada pelo aparato experimental, pois a diferença entre a temperatura da base ($T_{(base)}$) e a temperatura média do fluido ($\bar{T}_{fluido}$) permaneceu em torno de 16 ($^{\circ}C$), que é bem acima da tolerância dos termopares de ± 1 ($^{\circ}C$);
- Os perfis de temperatura sobre o trecho da broca simulado são bem irregulares devido a geometria complexo da broca;
- O valor de $\bar{h}_{fluido}$ é mais influenciado pela vazão do que pela rotação;
- Com relação a influência da rotação sobre o valor de $\bar{h}_{fluido}$, a menor rotação que é de 345 (rpm) mostrou-se mais influente do que as demais rotações, porém o aumento da vazão torna essa influência menor;
- O valor de $\bar{h}_{fluido}$ aumenta de modo linear com a vazão;
- O valor máximo de $\bar{h}_{fluido}$, que foi de 3235.58 ($\frac{W}{m^2K}$), foi registrado a vazão de 0.40 (L/min) com 365 (rpm) e o valor mínimo, que foi de 2454.76 ($\frac{W}{m^2K}$), foi registrado a vazão de 0.20 (L/min) a 345 (rpm);
- Os valores de $\bar{h}_{fluido}$ ficaram dentro do esperado para convecção forçada de líquidos;

REFERÊNCIAS

- [1] Ber, A., and M. Goldblatt. The influence of temperature gradient on cutting tool's life. CIRP Annals-Manufacturing Technology 38.1 (1989): 69-73.
- [2] Karas, A., Bouzit, M., and Belarbi, M. (2013). Development of a thermal model in the metal cutting process for prediction of temperature distributions at the tool-chip-workpiece interface. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 51(3), 553-567.
- [3] Grzesik, W., Bartoszek, M., and Nieslony, P. (2004). Finite difference analysis of the thermal behaviour of coated tools in orthogonal cutting of steels. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(14), 1451-1462.
- [4] Lazoglu, I., and Altintas, Y. (2002). Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(9), 1011-1022.
- [5] M. Monno, G.M. Pittalà, A. Bareggi (2009). Finite elements modeling of titanium machining assisted by high speed air jet.
- [6] Obikawa, T., and Yamaguchi, M. (2013). Computational fluid dynamic analysis of coolant flow in turning. Procedia CIRP, 8, 271-275.
- [7] Obikawa, T., Asano, Y., and Kamata, Y. (2009). Computer fluid dynamics analysis for efficient spraying of oil mist in finish-turning of Inconel 718. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49(12), 971-978.
- [8] Wakabayashi, T. (2010). The role of tribology in Environmentally Friendly MQL Machining. JTEKT, Engineering Journal, 1007E.
- [9] Kurgin, S., Dasch, J. M., Simon, D. L., Barber, G. C., and Zou, Q. (2012). Evaluation of the convective heat transfer coefficient for minimum quantity lubrication (MQL). Industrial Lubrication and Tribology, 64(6), 376-386.

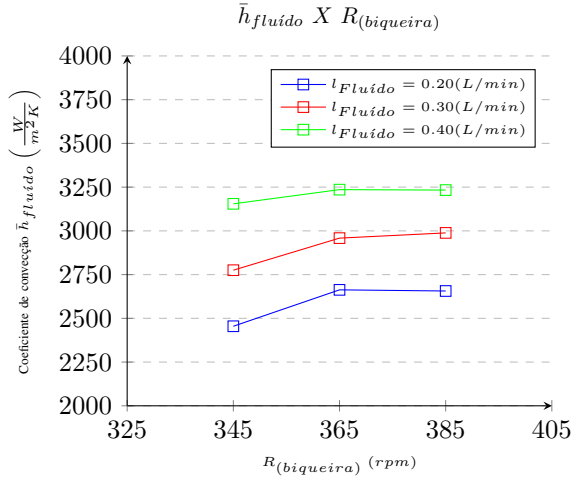


Figura 11. Coeficiente médio de convecção ($\bar{h}_{fluido}$) em função da rotação da biqueira ($R_{(biqueira)}$).

pra segunda rotação ($R_{(biqueira)} = 365$ (rpm)). Após isso da segunda rotação ($R_{(biqueira)} = 365$ (rpm)) para a terceira rotação ($R_{(biqueira)} = 385$ (rpm)), os valores de $\bar{h}_{fluido}$ apresentam uma tendência de estabilização.

Já os coeficientes médios de convecção do fluido ($\bar{h}_{fluido}$) em função da vazão (l_{Fluido}) podem ser vistos no gráfico da Fig. 12. Os valores de $\bar{h}_{fluido}$ aumentam com a vazão de maneira linear sendo que para a menor rotação ($R_{(biqueira)} = 345$ (rpm)) os valores de $\bar{h}_{fluido}$ são um pouco menores.

Como o esperado, para ambos os gráficos (Fig.11 e Fig. 12) maiores valores de l_{Fluido} refletem em maiores valores no coeficiente médio de convecção ($\bar{h}_{fluido}$).

Os valores de $\bar{h}_{fluido}$ ficaram dentro do esperado para convecção forçada de líquidos, cuja faixa de valores fica dentro de 100 a 20000 ($\frac{W}{m^2K}$) [23].

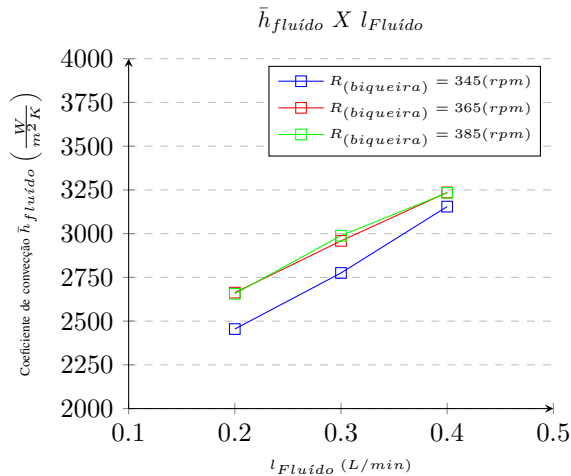


Figura 12. Coeficiente médio de convecção ($\bar{h}_{fluido}$) em função da vazão de fluido (l_{Fluido}).

- [10] Wakabayashi, T., Suda, S., Inasaki, I., Terasaka, K., Musha, Y., and Toda, Y. (2007). Tribological action and cutting performance of MQL media in machining of aluminum. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 56(1), 97-100.
- [11] Biermann, D., and Iovkov, I. (2013). Modeling and simulation of heat input in deep-hole drilling with twist drills and MQL. *Procedia CIRP*, 8, 88-93.
- [12] Biermann, D., Iovkov, I., Blum, H., Rademacher, A., Taebi, K., Suttmeier, F. T., and Klein, N. (2012). Thermal aspects in deep hole drilling of aluminium cast alloy using twist drills and MQL. *Procedia CIRP*, 3, 245-250.
- [13] Najiha, M. S., and Rahman, M. M. (2014). A computational fluid dynamics analysis of single and three nozzles minimum quantity lubricant flow for milling. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 10, 1891.
- [14] Zdanski, P. S. B., Pauli, D., and Dauner, F. A. L. (2015). Effects of delta winglet vortex generators on flow of air over in-line tube bank: A new empirical correlation for heat transfer prediction. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 67, 89-96.
- [15] Diani, A., Mancin, S., Zilio, C., and Rossetto, L. (2013). An assessment on air forced convection on extended surfaces: Experimental results and numerical modeling. *International Journal of Thermal Sciences*, 67, 120-134.
- [16] Chen, H. T., Lin, S. Y., and Fang, L. C. (2001). Estimation of surface temperature in two-dimensional inverse heat conduction problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(8), 1455-1463.
- [17] Chen, H. T., Lin, S. Y., Wang, H. R., and Fang, L. C. (2002). Estimation of two-sided boundary conditions for two-dimensional inverse heat conduction problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(1), 15-23.
- [18] Chen, H. T., and Wu, X. Y. (2006). Estimation of surface absorptivity in laser surface heating process with experimental data. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(6), 1141.
- [19] Chen, H. T., and Hsu, W. L. (2007). Estimation of heat transfer coefficient on the fin of annular-finned tube heat exchangers in natural convection for various fin spacings. *International journal of heat and mass transfer*, 50(9), 1750-1761.
- [20] Chen, H. T., and Wu, X. Y. (2008). Investigation of heat transfer coefficient in two dimensional transient inverse heat conduction problems using the hybrid inverse scheme. *International journal for numerical methods in engineering*, 73(1), 107-122.
- [21] Huang, C. H., and Chen, W. C. (2000). A three-dimensional inverse forced convection problem in estimating surface heat flux by conjugate gradient method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(17), 3171-3181.
- [22] Yang, Y. T., and Hsu, P. T. (1997). A three-dimensional inverse heat conduction problem approach for estimating the heat flux and surface temperature of a hollow cylinder. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 30(9), 1326.
- [23] Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., and Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley and Sons.
- [24] Tay, A. A. O. (1993). A review of methods of calculating machining temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, 36(3), 225-257.
- [25] Nuteç Ibar Fibras Cerâmicas Ltda (2016). Folha de dados técnicos: Produto: Manta de fibra cerâmica HP. Poá, São Paulo. 2 f. (Revisão 05).