

ANÁLISE COMPUTACIONAL PARA PROJETO DE RESFRIADOR PARA POLIPROPILENO

Fabio Kiyoshi Fugiwara (fabiofugiwara@yahoo.com.br)

Valesca Alves Correa (valesca@unitau.br)

Carlos Alberto Chaves (chaves@unitau.br)

José Rui Camargo (rui@unitau.br)

UNITAU, Engenharia Mecânica, R. Daniel Danelli, s/n, Jardim Morumbi, 12060-440, Taubaté/SP

***Resumo.** Este trabalho tem como objetivo a investigação do campo de escoamento de fluidos em um ambiente industrial para a otimização do resfriamento de peças compostas de polipropileno. A temperatura inicial da peça até o ponto de inspeção pelo operador apresentava-se excessiva e não ideal para condições normais de trabalho. Simulações computacionais transientes tridimensionais foram realizadas com o software comercial ANSYS CFX, onde os dados coletados foram comparados com a situação real. A variável relevante do escoamento foi a temperatura, o qual não poderia alcançar valores elevados em certas condições críticas. Os resultados numéricos foram avaliados e permitiram a melhor escolha do processo de resfriamento das peças. A aplicação das simulações computacionais proporcionou a obtenção dos melhores parâmetros para a otimização do resfriamento sanando possíveis erros de projeto.*

***Palavras-chave:** CFD, projeto, simulação, software.*

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de acelerar o desenvolvimento de projetos e buscar cada vez mais melhorias na verificação de erros e baixar custos envolvendo protótipos e testes antes do projeto ser construído e implantado passou a ser fundamental para as empresas que atuam na área de engenharia. As simulações computacionais que utilizam métodos numéricos como o método dos volumes finitos tem se mostradas aptas a exibir situações virtuais que muito se aproximam das situações realísticas (Maliska, 2004).

Uma vez que análises feitas virtualmente mostram resultados com alta confiabilidade, cabe ao desenvolvedor visualizar os pontos que podem ser otimizados e/ou modificados, confirmando assim, a eficiência da utilização dos softwares de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) no desenvolvimento de projetos (Fortuna, 2000).

Neste trabalho serão abordados todos os passos seguidos desde a concepção até a implantação de um projeto, com os dados necessários para o alcance de uma conclusão robusta de funcionalidade de um sistema de resfriamento utilizando o ar como trocador de calor impulsionado por um motor elétrico munido com hélices em uma estrutura confeccionada por chapas metálicas e direcionadores de fluxo aerodinâmico (Camargo e Ebinuma, 2002).

Para resolução do problema, utilizou-se da modelagem com transferência de calor como base de análise térmica com unificação de situações diferentes em um mesmo domínio (Menter e Kuntz, 2000).

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Houve a necessidade da implantação de um sistema, onde o calor dissipado e o comportamento do resfriamento natural na peça em estudo geraram dados que foram relacionados em função do tempo expresso em segundos e da temperatura em graus Celsius. Foi observado que a temperatura inicial da peça até o ponto de inspeção pelo operador não seria ideal para condições normais de trabalho, ou seja, o operador ficava em exposição excessiva de calor nas mãos.

O projeto foi desenvolvido por software de desenho auxiliado por computador (CAD), modelado em 3 dimensões com todas as medidas exatas do local em estudo. Toda a fase de desenvolvimento foi realizada com quantidade de material disponível que não era utilizado, sendo que todos os detalhes tinham que ser exatamente calculados para que não houvesse interferência de algumas estruturas.

Inicialmente foi feita uma verificação da quantidade de chapa de aço obsoleta disponível, o qual foi direcionada à construção do resfriador, sendo compatível com a quantidade necessária do desenho, concluindo-se que a área total cobria toda a expectativa, não sendo necessária à compra de novo material.

A seguir foi realizada uma análise fluidodinâmica no software comercial Ansys CFX (CFX, 2009), observando-se que de acordo com o desenho ainda não haveria troca de calor suficiente para resfriar a peça, pois o fluxo de ar gerado não correria corretamente devido seu escoamento laminar e conseqüentemente não tocava na peça. Foi realizado um estudo em relação à turbulência, e aplicaram-se conceitos de aerodinâmica (Wilcox, 2000).

Por elementos básicos que são usualmente discutidos na aerodinâmica, os “flaps”, algumas análises foram feitas com diferentes modelos e diferentes ângulos de ataque para checar a melhor posição de implantação.

Com o resultado esperado, a turbulência foi gerada na região correta, onde as peças passariam sendo resfriadas pela corrente de ar, definindo então o local específico dos “flaps”.

Um ponto foi observado em relação às hélices do motor e a rotação, que, antes sendo utilizados como sistema de exaustão não teriam a mesma eficiência sendo aplicados como insuflador, o que levou a modificação da posição do motor e o ângulo de ataque das hélices, resultando em um ganho de eficiência em fluxo de ar, maior turbulência e menor perda por arrasto devido à posição do motor.

Finalmente, o projeto apresentou-se capaz de resfriar as peças em uma taxa de temperatura e um intervalo de tempo esperado, onde o calor da peça no local de inspeção está adequado para não danificar a saúde das mãos do operador, incluindo uma taxa de aceleração de cura do componente químico que pela temperatura alta gerava refugos.

3. MATERIAL E MÉTODO

A seguir serão descritas as metodologias utilizadas para realização da simulação computacional do processo de resfriamento no local com alguns dados de entrada como potência e rotação do rotor.

3.1. Coleta de Dados Experimentais

Seguiu-se com a coleta dos dados referentes às variações e taxa de resfriamento natural das peças em temperatura ambiente, e com auxílio de pistola termômetro modelo TI-890 Instrutherm, com escala de -50°C à 1000°C, precisão de $\pm 2\%$ da leitura e 500ms de resposta, calibrada em 2009 por empresa certificada, contando com um cronômetro digital para acompanhamento transiente.

As condições de coleta seguiram-se em um dia com médio pico de temperatura a fim de se ter um resultado com limites prévios de variação, onde se acompanhou a saída num intervalo de tempo de 20 minutos contando a partir da saída da estufa.

A Figura (1) apresenta um esquema do layout do local, onde as posições circuladas são: saída da estufa (3), peças a serem resfriadas (2) e ambiente de trabalho (1). O fluxo de saída das peças que são movimentadas por suportes deslizantes para a operação final de inspeção, resulta na problemática do encontro das peças superaquecidas com as mãos do operador, onde será realizada a análise para a melhor disposição do sistema de resfriamento.

Uma peça foi escolhida aleatoriamente, seguindo-se todo o seu fluxo até a operação final, onde se anotou todos os comportamentos de temperatura por auxílio da pistola termômetro e o tempo medido por um cronômetro digital.

Os tempos foram seguidos de acordo com o gargalo de saída das peças no local, para que o cálculo mostrasse a melhor condição de localização das operações, nas quais, o resfriador deveria estar e com quais características técnicas de resfriamento possíveis poderiam ser aplicadas.

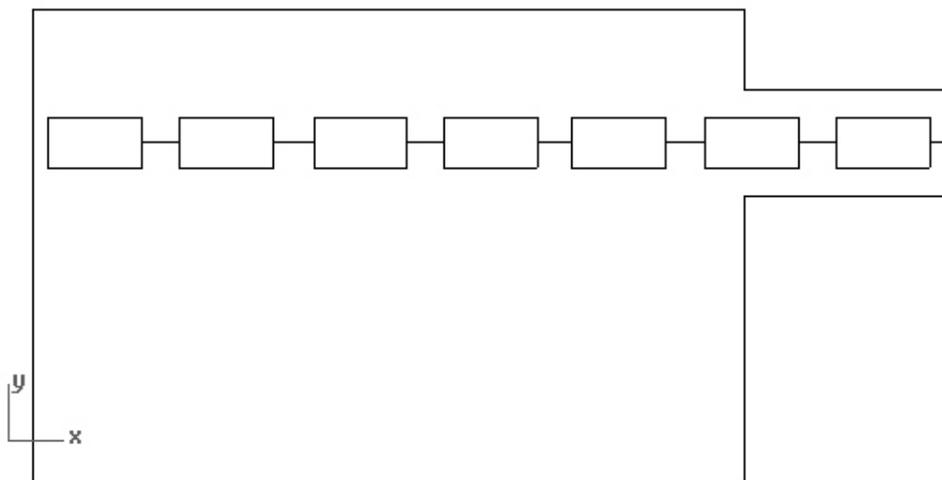


Figura 1. Representação do ambiente físico.

3.2. Modelagem Matemática

Devido ao comportamento de resfriamento das peças, e pelo fato das variáveis envolvidas estarem em função do tempo, a equação apropriada para aplicação neste caso foi a Eq. (1) de Resfriamento de Newton, onde os dados coletados experimentalmente puderam ser aplicados para obtenção da constante de resfriamento “k” contida na Eq. (1), foram transferidos em uma planilha eletrônica gerando um gráfico com comportamento exponencial, assim como previsto pela Eq. (1), mostrando que o sistema poderia ser modelado para a aplicação de um resfriador por insuflamento de ar, devido a não aparentar instabilidade na temperatura.

$$T = (T_0 - T_f) \cdot e^{-k \cdot t} + T_f \quad (1)$$

onde:

T é a temperatura do corpo num determinado instante,
 T_0 é a temperatura inicial do corpo,
 T_f é a temperatura final do corpo,
 “t” é o tempo contado a partir do resfriamento (contato ar_peça) e
 “k” uma constante determinada experimentalmente.

Neste caso, dando resolução da equação, foi determinada a constante de resfriamento, para uma possível estimativa de tempo e conseqüentemente posição onde a temperatura operacional teria um valor considerável.

A posição ideal mostrada de acordo com a variação da temperatura e o tempo seria num ponto não equivalente devido ao layout disponível, ou seja, a localização estaria num ponto onde a realização da operação com a temperatura correta não seria possível, sendo assim, foi criado para melhor visualização um layout tridimensional, conforme Fig. (2).

O local inadequado (B) deve a sua posição no layout e o fluxo incorreto para o processo, porém, nesta posição em que as peças possuíam uma temperatura em condições para operação, ao contrário do local (A), chegando a uma breve conclusão analítica de que o posicionamento da operação estava afetado devido ao calor sensível da peça.

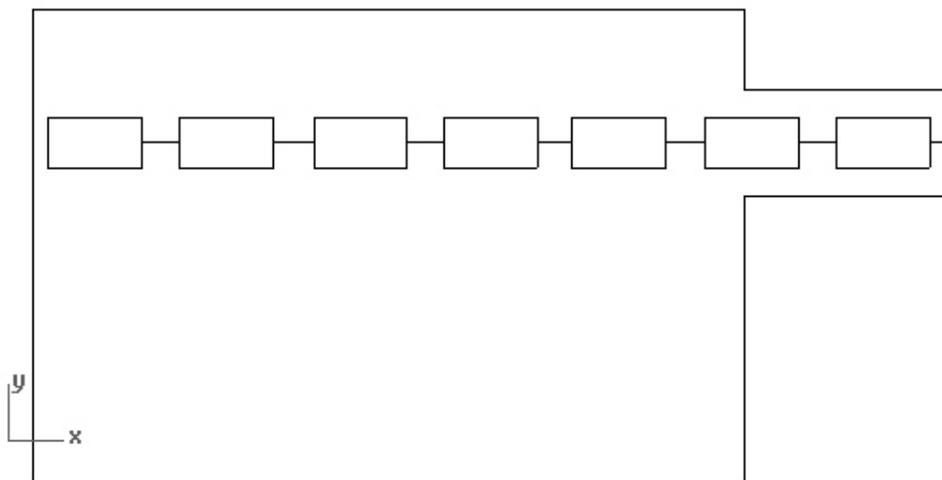


Figura 2. Representação esquemática do local.

3.3. Criação do Layout em Três Dimensões

Para garantia da posição e a proporção do local em estudo, todo o layout foi desenhado em escala 1:1 auxiliado por computador no Software Rhinoceros. Desta forma, todos os detalhes dimensionais foram inclusos na análise garantindo a robustez do estudo.

Analiticamente, o volume de análise foi limitado apenas na região onde se aplicaria o resfriador contando com uma região em que a vazão do ar afetaria uma determinada distância, fechando assim as condições de fronteira.

3.4. Software para Simulação

Tratando-se de um problema fluidodinâmico, a escolha deu-se pelo Software Comercial ANSYS CFX, disponibilizado pelo Pólo Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica a fim de estudo de caso e pesquisa. O software apresenta grande capacidade de análise e boa confiabilidade dos resultados, reforçando seu uso.

Com todas as situações já obtidas para a simulação, os passos seguintes mostram como foram definidos todos os parâmetros no programa ANSYS CFX, seguindo por definição de malha, as condições de contorno, parâmetros de cálculo e obtenção dos resultados.

3.4.1. A definição da geometria

O layout modelado tridimensionalmente por computador permitiu fazer “pré-análises” das otimizações que poderiam ser feitas para que aumentasse a eficiência do resfriador. Sendo também permitida após a simulação, a localização e implantação do sistema no local correto e logo realizado outra simulação para a validação da melhoria, o que será discutido posteriormente.

3.4.2. Definição da malha

A abordagem da geometria relacionando o espaço físico, dados pelas condições do ambiente em relação à linguagem computacional e dos volumes finitos precisa ser definida corretamente de acordo com a relação e proporcionalidade da resolução dos resultados (Morais, 2004).

A geometria gerada considera-se complexa por não ter uma continuidade uniforme dos elementos, no qual alguns pontos na geração da malha devem ser observados.

O pacote utilizado para a malha foi o CFX Mesh, incluso no ANSYS WorkBench, por possuir uma interface gráfica de fácil visualização, foi observado que algumas melhorias tinham de ser feitas na malha, assim como o “refinamento” para que os pontos ou os “nós” pudessem ser melhor ajustados com a forma criada.

Ajustes como ângulo interno mínimo, espaçamento resolução angular, escala e estratégia de “malhamento”.

A malha resultante é não estruturada, devido às disposições dos elementos da malha.

3.4.3. Definição das condições de contorno

Recuperando os dados citados por todo o comportamento no local em estudo coletados, neste passo a maior preocupação foi a singularidade das variáveis e dos valores reais para serem introduzidos nas condições de contorno da análise computacional.

O primeiro passo para que as condições fossem impostas foi definir o fluxo de entradas e saídas, chamados no CFX de “inlets” e “outlets”, que são caracterizados como onde o fluido entra e por onde sai.

O módulo utilizado foi o CFX Pre, onde permite indicar todas as condições nas regiões da malha gerada pelo CFX Mesh e apresentada na Fig. (3).

Os dados como temperatura do local, fluxo de ar normal, calor sensível das peças, pressão atmosférica foram todos coletados com instrumentos para dar maior similaridade do caso real na análise, onde as condições foram impostas na ordem: temperatura de saída do ar da estufa, temperatura de saída das peças, medição do tempo de resfriamento até um dado ponto, temperatura ambiente, pressão atmosférica, rotação do motor, velocidade de saída do ar do rotor, temperatura de entrada de ar no rotor e fronteiras para identificar toda parte aerodinâmica do resfriador.

No caso, a temperatura de saída do ar da estufa no local considerou-se 80°C, a temperatura de saída das peças com 76°C, o tempo foi considerando até que a peça atingisse temperatura ambiente com 18,48 minutos, 27°C como temperatura ambiente, 1 atm como pressão local atmosférica, rotação do motor de 1750 rpm, com velocidade de saída do ar do rotor com 18 m/s e regime permanente.

Todas estas condições foram impostas nos locais determinados na malha que imita o local em estudo, e logo passado para o passo seguinte, o CFX Solver.

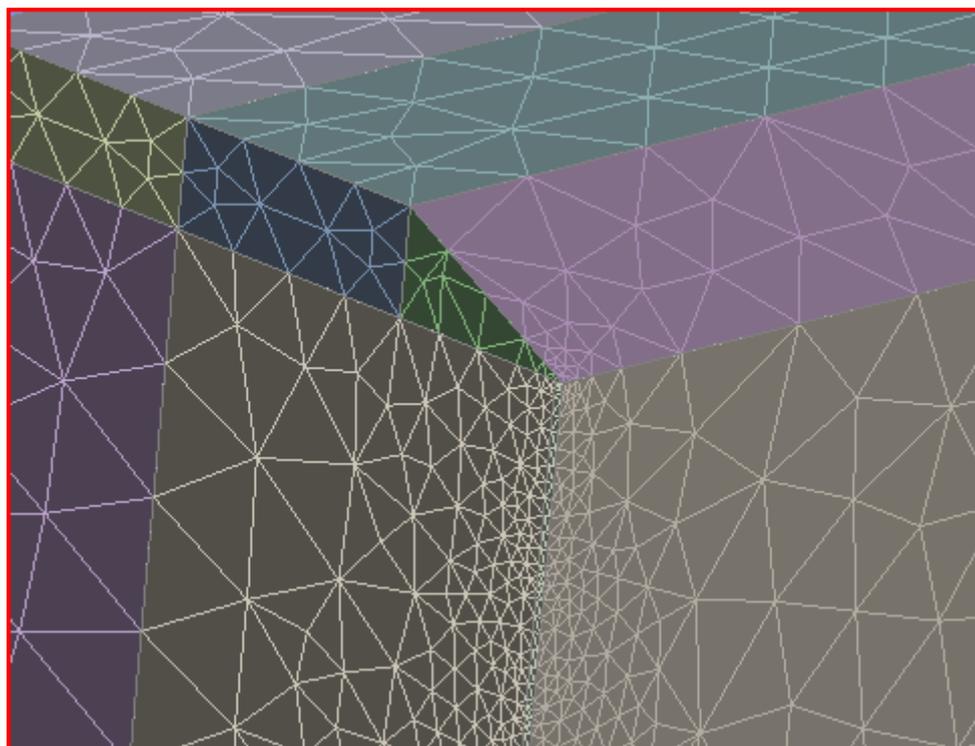


Figura 3. Concentração dos elementos de malha.

3.4.4. Definição dos métodos numéricos

Para a definição dos parâmetros de resolução do sistema, utilizou-se o módulo CFX Solver que possui algoritmos definidos.

Nesta etapa, todas as condições estão prontas para que todo o sistema seja modelado matematicamente e assim iniciar o processo de resolução auxiliado pelo computador através das equações que governam o problema (Bird, 1960).

Assim como as condições de contorno e as características da malha, o CFX Solver é ajustável de acordo com a situação e resolução desejada do problema, onde são os principais pontos vistos como ponto de convergência, taxa residual (RMS) e número de iterações, onde é visto o critério de convergência e

caso não haja logo nas primeiras iterações um *looping* é ativo como uma sub-rotina para checar a convergência novamente, caso não tenha, a iteração é passada para a seguinte.

Para a solução numérica foi previsto o tempo necessário para processamento do computador e também o desempenho, no que se considerou em reduzir os critérios de convergência para a rápida resolução e menor recurso computacional, visto que toda a análise foi feita em um computador com características de hardware básicas não permitindo também que fosse imposta uma análise mais robusta, mas também não diz que o resultado divergiu com o esperado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados coletados em condições reais de operação seguem na Tab. (1), mostrando a variação da temperatura do polipropileno em relação ao tempo. De acordo com a Eq. (1) o comportamento da curva resultante dado pelo gráfico Temperatura versus Tempo apresentado na Fig. (4) mostra a tendência de resfriamento das peças no qual os dados mostram a mesma tendência.

O gráfico resultante dos dados coletados é apresentado também na Fig. (4) e mostra o comportamento de resfriamento do polipropileno em condições normais, antes do resfriador.

Com o projeto instalado, novas medições foram feitas para averiguar a eficiência do resfriador, o resultado segue ilustrado no gráfico apresentado na Fig. (5).

Já com o sistema construído, previa-se algumas situações em relação ao comportamento do ar com a temperatura e o escoamento e é apresentado na Fig. (6). O sistema foi comparado com as análises feitas pelo ANSYS CFX, mostrando um real comportamento. A situação inicial dava-se pelo conceito, conforme Fig. (6), onde se pode observar na vista superior do local em estudo o comportamento apenas com insufladores laterais (região B) e o comportamento térmico na saída de uma estufa (região A).

O resfriador apresentado na Fig. (7) provido com os itens aerodinâmicos produziu efeitos idênticos ao construído.

De acordo com as chapas metálicas, todos os pontos foram soldados e cortados para uma fácil montagem. Os efeitos na análise computacional, apresentados na Fig. (8), após a instalação em frente à estufa mostravam exatamente o fluxo de ar escoado em relação ao fluxo estudado no resfriador implantado, conforme Fig. (9).

A assimetria mostrada no escoamento acima foi um fato importante notado, pois, mesmo no resfriador real o fluxo estava na mesma condição de velocidade, o que melhorou ainda mais a disposição da direção do fluxo de ar nas peças que saíam.

Todos os dados das análises e os com o resfriador real se encaixaram perfeitamente dando a conclusão de que foi totalmente viável, otimizando tempo em realizações de testes, auxiliando na aquisição de dados, visão do escoamento do ar e implantação de acessórios aerodinâmicos para otimização do fluxo.

Tabela 01. Variação da temperatura com o tempo.

Tempo (h)	0	0,014	0,049	0,07	0,098	0,11	0,126	0,15	0,154	0,168	0,182	0,196	0,21	0,224	0,238	0,252	0,266	0,28	0,294	0,308	
Tempo (min)	0	0,84	2,94	4,2	5,88	6,72	7,56	9	9,24	10,08	10,92	11,76	12,6	13,44	14,28	15,12	15,96	16,8	17,64	18,48	
Temperatura (°C)	72	64	52,6	48	37	27	26,9	26,8	26,8	26,7	26,5	26,45	26,35	26,25	26,15	26,15	26,15	26,15	26,15	26,15	26,15

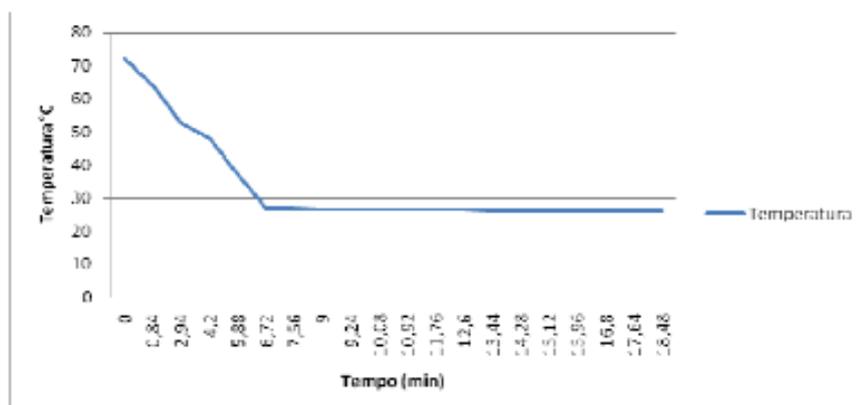


Figura 4. Variação da temperatura com o tempo.

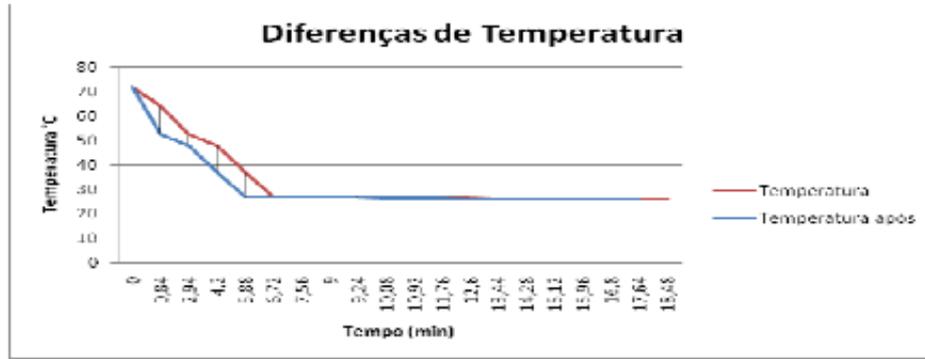


Figura 5. Diferenças entre a temperatura antes e depois.

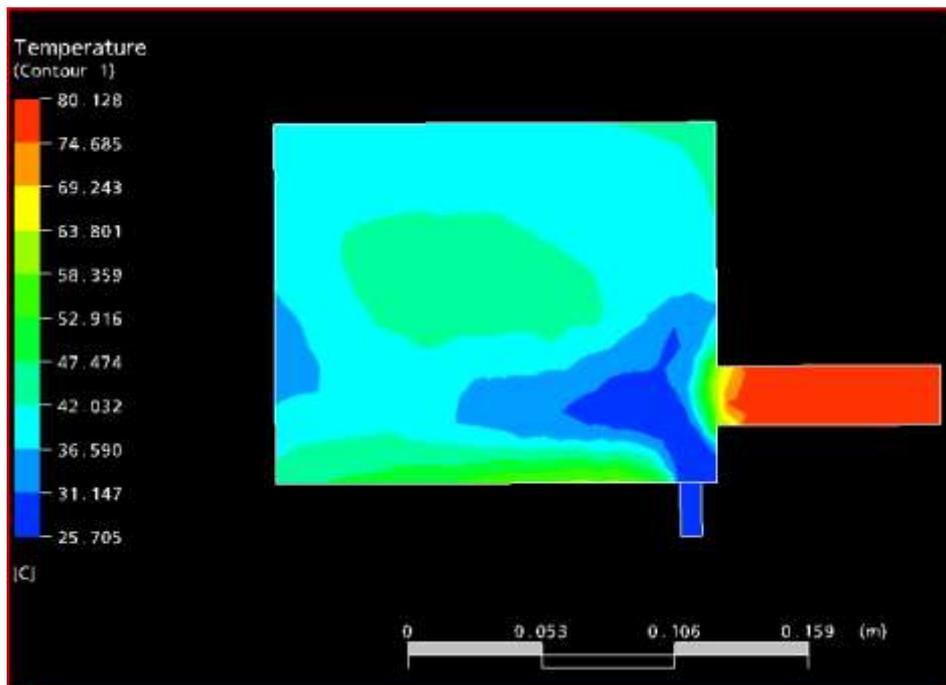


Figura 6. Variação da temperatura com o tempo.

A troca de calor usando a turbulência foi um bom desafio, devido aos pontos vistos por alguns autores de experimentos similares usando jatos de ar para estudo da turbulência em relação à troca de calor, pois devia-se saber exatamente onde seria a direção correta do escoamento na peça. Os pontos favoráveis para a implantação foram satisfeitos, seguindo conceitos de segurança no trabalho, no qual o problema de super aquecimento das peças para os operadores foi resolvido com sucesso, chegando à taxa de resfriamento de 7°C à 13°C por minuto por peça.

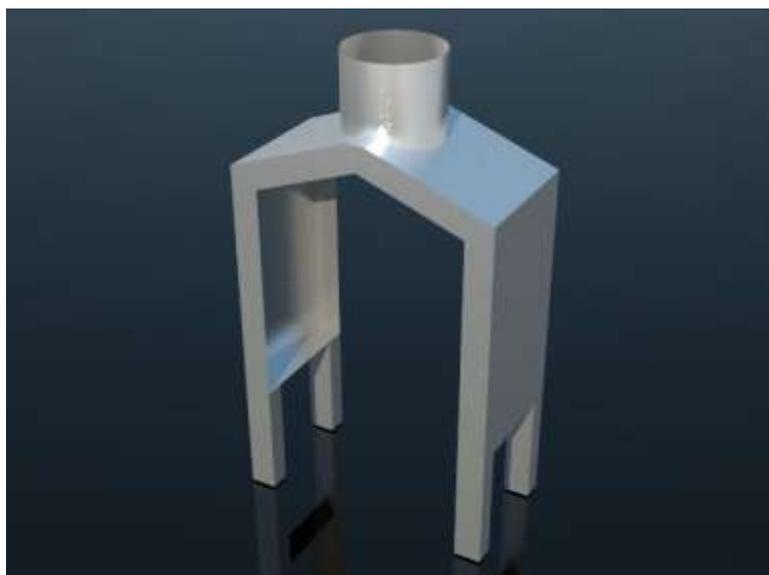


Figura 7. Imagem esquemática renderizada do resfriador.

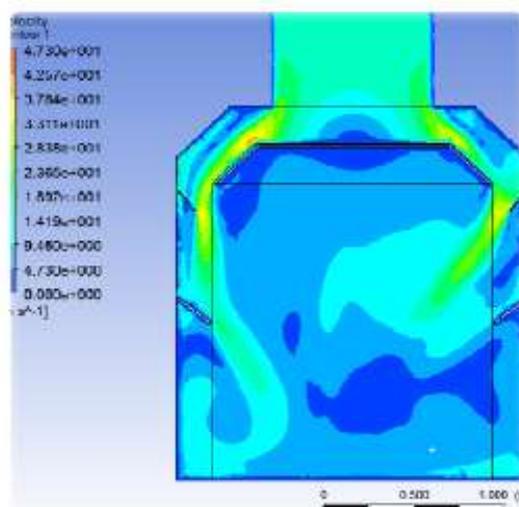


Figura 8. Contornos mostrando as regiões de velocidade de escoamento de ar.

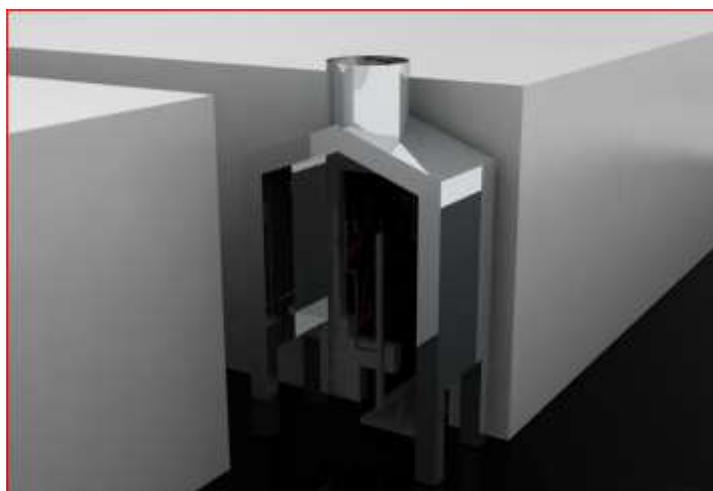


Figura 9. Renderização do local onde o resfriador foi implantado.

5. CONCLUSÕES

O projeto desenvolvido não teria ter sido mais rápido sem a ajuda do software, o que mostra a redução de tempo em projetos desde os mais simples até os mais complexos.

Todo resultado foi positivo, não ressaltando nenhum ponto em desvantagem, concluindo na implantação do resfriador no local especificado, a satisfação e melhoria de condições de trabalho.

A comparação com a análise computacional mostrou novamente, confirmando a confiabilidade do software como outros autores, além dos resultados e pontos de melhoria do projeto, no que após foram corrigidos obtendo-se finalmente um resultado que satisfaria as condições impostas no problema em questão.

O resfriador foi implantado e sua função está perfeitamente de acordo com o projeto, resfriando as peças, causando uma melhor condição de trabalho e atingindo outros importantes pontos no processo de fabricação.

6. REFERÊNCIAS

- Bird R. B., Stewart W. E. , Lightfoot E. N. (1960) Transport Phenomena. John Wiley & Sons, INC.
- Camargo J. R., Ebinuma C. D. (2002) Modelo matemático para resfriamento evaporativo direto e indireto para sistemas de condicionamento de ar, IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - ENCIT, Caxambu – MG, Brasil, CIT02-0855.
- CFX (2008) Software for Fluid Dynamics, ANSYS, versão 12.
- Fortuna A. R. (2000) Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- Morais E. L. (2004) Verificação de Soluções Numéricas de Escoamentos Laminares Obtidas com o Método dos Volumes Finitos e Malhas Não-estruturadas. Dissertação de Mestrado, Curitiba.
- Maliska C. R. (2004) Transferência de Calor e Mecânica dos fluidos computacional. Rio de Janeiro, LTC.
- Wilcox D. C. (2000) Turbulence Modelling for CFD. DCW Industries, p. 314.
- Menter F. R., Kuntz M. (2000) Development and Application of a Zonal DES Turbulence Model for CFX-5, CFX Validation Report, CFX-VAL 17/0503.

DIREITOS AUTORAIS

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