



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS DA UNICAMP  
REPOSITÓRIO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E INTELLECTUAL DA UNICAMP

**Versão do arquivo anexado / Version of attached file:**

Versão do Editor / Published Version

**Mais informações no site da editora / Further information on publisher's website:**

<http://www.revista.unisal.br/sj/index.php/123/article/view/693>

**DOI: 0**

**Direitos autorais / Publisher's copyright statement:**

©2017.0 by Centro Universitário Salesiano. All rights reserved.

DIRETORIA DE TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

Cidade Universitária Zeferino Vaz Barão Geraldo

CEP 13083-970 – Campinas SP

Fone: (19) 3521-6493

<http://www.repositorio.unicamp.br>

# Avaliação do coeficiente de transferência de calor de estufa de secagem de fitas adesivas do tipo fluxo de ar de processo perpendicular ao substrato

Joaquim Xavier Nogueira<sup>1</sup>, Caio Glauco Sanchez<sup>2</sup> e Eduardo de Britto Perez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mestre em Engenharia Mecânica, [jxnogueira2@gmail.com](mailto:jxnogueira2@gmail.com)

<sup>2</sup>Doutorado em Engenharia Mecânica, Professor na Universidade Estadual de Campinas, [caio@fem.unicamp.br](mailto:caio@fem.unicamp.br)

<sup>3</sup>Doutor em Engenharia Mecânica, 3M do Brasil Ltda, [ebperez@mmm.com](mailto:ebperez@mmm.com)

**Resumo** – As estufas de convecção forçada de ar quente são componentes vitais no processo de manufatura de fitas adesivas. Elas servem para promover a evaporação do solvente presente nos adesivos ou fornecer a energia necessária para reações químicas. Sabe-se que o coeficiente de transferência de calor é de suma importância no processo de transferência de energia por convecção na determinação do comprimento final de uma estufa. Por este coeficiente estar intimamente relacionado ao tipo de escoamento de ar, este trabalho apresenta uma metodologia para a sua medição e, também, resultados experimentais que são comparados a modelos desenvolvidos por outros autores. A diferença do coeficiente de transferência de calor medido por esta metodologia e comparado com outros autores mostrou-se muito pequena, com uma variabilidade de 1,19%. Altos valores de coeficiente de transferência de calor são desejáveis para o aumento da velocidade de secagem.

**Palavras-chave:** Avaliação térmica, estufas de secagem de fitas adesivas, coeficiente de transferência de calor.

**Abstract** – Hot air forced convection ovens are vital components in the manufacturing process of adhesive tapes. They serve to promote evaporation of the solvent present in the adhesives or provide the energy required for chemical reactions. Due to the importance of the heat transfer coefficient in the convective energy transfer process in determining the final length of a greenhouse, as a greenhouse project quality, and because it is closely related to the type of air flow, this work presents a Methodology for their measurement and also experimental results that are compared to models developed by other authors. The difference of the heat transfer coefficient measured by this methodology and compared with other authors was very small, with a variability of 1.19 %. High heat transfer coefficient values are desirable for increasing the drying velocity.

**Keywords:** thermal evaluation, drying ovens for adhesive tapes, heat transfer coefficient.

## I. INTRODUÇÃO

As fitas adesivas são empregadas em inúmeros segmentos de mercado, sendo encontradas desde o uso doméstico e de escritório até em aplicações extremamente complexas de substituição de outras formas de fixação convencionais como parafusos, grampos e rebites. Fita adesiva é um nome genérico para uma gama de produtos. Existem fitas simples-face, dupla-face, transferíveis e, conforme a sua utilização, podem ser filamentosas, de proteção, mascaramento, uso automotivo, estrutural, etc. O processo de manufatura das fitas adesivas envolve quatro operações, desde o recebimento das matérias-primas até o envio dos rolos de produto ao cliente. A primeira etapa é a do preparo do adesivo, sendo basicamente química, feita em reatores ou misturadores. A segunda operação consiste na aplicação do revestimento do adesivo sobre o substrato e a secagem do solvente presente no adesivo. Estas duas etapas são realizadas no mesmo equipamento, a cobrideira, que contém uma estufa de convecção forçada, que será o equipamento em estudo. O solvente do adesivo é evaporado e depois carregado para os termo-oxidadores ou recuperadores de solvente. A terceira etapa é o corte da fita em rolos, realizada por cortadeiras que recebem os rolos de largura entre 1.000 mm e 2.000 mm e os transformam em rolos de alguns milímetros de largura para uso final.

O comprimento da estufa que promove a secagem do solvente (na terceira etapa) determina a velocidade de produção de uma cobrideira. Quanto maior o comprimento da estufa, maior a velocidade de produção. Em cobrideiras de fitas adesivas, a velocidade de produção varia entre 20 m/min e 200 m/min, e o comprimento da estufa varia entre 20 m à 80 m. Uma estufa de secagem de fitas adesivas é formada por módulos ou zonas independentes, geralmente em número de 4 a 8, onde os principais parâmetros de ajuste são a temperatura e a vazão do ar que incide na superfície do substrato revestido. A convecção forçada de ar é o meio de transferência de calor predominante para promover a secagem do solvente.

A estufa é o componente mais caro de uma cobrideira, podendo chegar a 70 % do valor total. Assim, é muito importante que a estufa seja bem projetada e utilizada de maneira otimizada para garantir um menor custo unitário de fabricação. Uma estufa de secagem de

fitas adesivas é formada por módulos ou zonas independentes, geralmente em número de 4 a 8, onde os principais parâmetros de ajuste são a temperatura e a vazão do ar que incide na superfície do substrato revestido. Além de ser o componente mais caro de uma cobrideira, a estufa é o maior consumidor de energia. A maior parcela da energia consumida por uma estufa é para o aquecimento do ar até a temperatura de operação de cada módulo, geralmente entre 60 a 220 graus Celsius. A vazão de ar a ser aquecida em cada módulo varia entre 1.000 a 15.000 m<sup>3</sup>/h. Assim, estufas típicas de secagem de fita adesiva consomem entre 800.000 kcal/h e 4.000.000 kcal/h, o que representa um alto valor mensal para operação contínua e, conseqüentemente, a otimização da operação de estufas do ponto de vista de consumo de energia é prioridade.

Em termos do funcionamento, o aquecimento do ar em uma estufa é feito por trocadores de calor onde a fonte de energia é o vapor ou óleo térmico. Neste caso, estes fluidos de transferência de calor são aquecidos em caldeiras ou aquecedores pela queima de combustíveis (gás natural, GLP, óleo combustível, madeira, biomassa, etc). Outra opção para aquecimento do ar é a queima direta do combustível (gás natural ou GLP) em queimadores acoplados a cada módulo da estufa. Esta opção dispensa o uso de trocadores de calor e, portanto, evita a perda de energia no processo. O equipamento em estudo utiliza este tipo de aquecimento.

O consumo de energia térmica de uma estufa também está ligado a formulação do adesivo. Adesivos que utilizam solventes inflamáveis, por questão de segurança e prevenção de incêndio, necessitam de um maior volume de ar para diluir a concentração dos vapores de solvente para níveis abaixo do Limite Mínimo de Inflamabilidade (*Level Flow Limit - LFL*). Naturalmente, este maior volume de ar requer maior carga de energia térmica, fato que não ocorre em adesivos a base de água ou sem solventes.

Para completar, as estufas de secagem de fitas adesivas, baseadas no processo de transferência de calor por convecção forçada, são pouco eficientes quando é considerada a relação entre energia teórica requerida para evaporar os solventes de um produto e a energia gasta, de fato, para aquecer o ar que transfere calor ao produto. Índices de eficiência entre 1% e 30% são comuns.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Basicamente uma estufa de secagem de fitas adesivas é uma enorme caixa dividida em módulos, contendo uma fresta para entrada e outra para saída do substrato em movimento. Em cada módulo há um duto por onde chega o ar aquecido que é forçado contra o substrato para secar o produto, e um duto de exaustão para retirada do ar carregado com vapores de solvente. A situação ideal do ponto de vista de aproveitamento energético seria se toda a energia recebida pelo ar

aquecido fosse utilizada para evaporar o solvente contido no produto. Como dito anteriormente, a eficiência energética de uma estufa de secagem de fitas adesivas costuma ser inerentemente baixa e outros fatores que serão mencionados aqui tendem a piorar ainda mais esta eficiência.

O primeiro fator importante para a eficiência de uma estufa é a qualidade do isolamento térmico de suas paredes. Os equipamentos são geralmente confeccionados em chapas de aço que envolvem o material isolante, numa construção multicamadas, que separam a região interna contendo ar a altas temperaturas e a região externa contendo ar a temperatura ambiente. Obviamente, estufas com isolamento térmico apropriado minimizam a perda de energia por condução por suas paredes.

Outro fator de extrema importância para eficiência energética de estufas é o nível possível de recirculação do fluxo de exaustão. Como dito anteriormente, o fluxo de ar que deixa a estufa pela exaustão carrega vapores de solvente e, portanto, pode se transformar em uma mistura inflamável se a concentração dos vapores de solvente atingir o limite mínimo de inflamabilidade (LFL). Cada solvente tem o seu LFL, que é dado em porcentagem em volume no ar. Por exemplo, o Tolueno possui LFL de 1,1% a 20°C, isto é, uma mistura de vapor de tolueno em ar na proporção de 1,1:100 em volume entra em combustão se uma faísca for gerada. Quanto maior for o nível de recirculação do ar de exaustão, maior será a economia de energia, pois se reduz a vazão de entrada de ar fresco na estufa.

Por fim, o coeficiente de transferência de calor  $h$  sobre o substrato é um parâmetro importante, pois impacta diretamente no comprimento da mesma. O coeficiente de transferência de calor é função da geometria interna da estufa e também da vazão de ar responsável pela convecção de energia para o produto. Coeficientes de transferência de calor típicos para a secagem de fitas adesivas variam entre 10 a 100 W/m<sup>2</sup> °C, dependendo das características construtivas da mesma.

São apresentados a seguir maiores detalhes sobre os principais componentes e parâmetros associados ao funcionamento de uma estufa de secagem de solvente para fitas adesivas.

### A. Modo de transferência de calor

Em [1] é apresentado o modelo de transferência de calor por convecção, mediante uma abordagem teórica robusta, sem perder de vista a necessidade de se ter uma ideia da ordem de grandeza dos cálculos. Para este fim, faz-se uso análise dimensional técnica, que permite obter soluções aproximadas de forma rápida de problemas complexos em geral. Para análise de problemas de convecção, é necessário conhecer tanto a distribuição de temperaturas na região do escoamento próximo da parede quanto a distribuição de velocidades

nesta região. Assim, as análises da convecção são baseadas não somente nas generalizações da aplicação do princípio de conservação de energia, mas também da conservação da massa e da quantidade de movimento do escoamento, sendo definido um problema de análise dimensional.

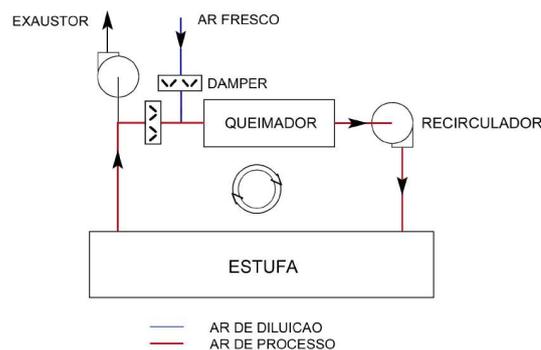
### B. Metodologias para projeto de estufas de secagem de fitas adesivas

O artigo publicado por [2] é considerado uma das referências existentes para projetos de estufa de fluxo de ar de processo perpendicular ao substrato. O trabalho apresenta um estudo minucioso dos fenômenos físicos e as respectivas descrições matemáticas envolvidas no escoamento de fluido em jatos colidindo perpendicularmente sobre uma superfície sólida ou líquida. A hidrodinâmica, transferência de calor e de massa associadas a este escoamento, é descrita em termos de adimensionais característicos. Ainda em [2] são propostos modelos baseados em parâmetros geométricos da estufa e condições experimentais para estimativa do coeficiente de transferência de calor em estufas com um único ou vários bocais de insuflação tipo fenda e tipo orifício e apresenta uma enorme quantidade de dados experimentais de outros autores que concordam bem com o modelo proposto. A maior contribuição prática de [2] é a apresentação de critérios para a configuração geométrica da estufa, visando maximizar o coeficiente de transferência de calor dada a vazão de ar de processo (que transfere o calor para o substrato). Este critério tem sido vastamente utilizado pelos fabricantes de estufas de secagem de fita adesiva. Também é apresentada uma discussão sobre o efeito (no coeficiente de transferência de calor) de dispositivos para aumento de turbulência na saída dos jatos de ar, malhas posicionadas sobre a superfície do substrato, ângulo do jato de ar de processo em relação ao substrato e outros fatores de projeto. A relação entre o ar de processo e o ar de exaustão ou diluição (aquele que é retirado da estufa e substituído por ar fresco a fim a garantir a renovação do ar) é importante e deve ser bem definida uma vez que a renovação é necessária para evitar que o ar de processo seja saturado com o solvente, o que pode afetar a taxa de secagem ou a operação segura da estufa.

O funcionamento de uma estufa de secagem de fitas adesivas, assim como os principais componentes dela são ilustrados na Figura 1.

Observa-se um recirculador de ar de processo e um exaustor, geralmente controlados por motor de velocidade variável, *dampers* de controle de vazão de entrada de ar fresco e vazão de ar de processo, um sistema de aquecimento de ar e toda a instrumentação e lógica necessários para o funcionamento do sistema.

Figura.1 – Estufa com recirculação derivada do duto de exaustão.

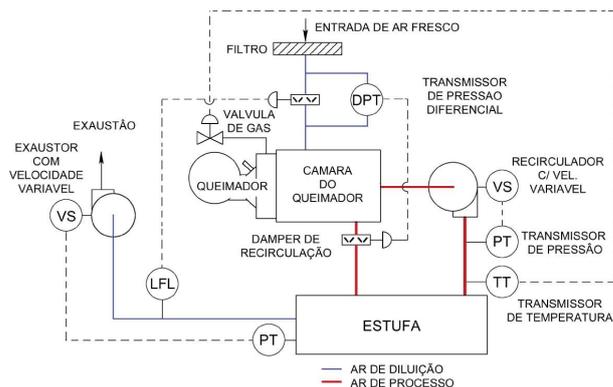


Fonte: [3].

O *dampers* que controla a vazão de entrada de ar fresco trabalha proporcionalmente ao sinal de um sensor de concentração de solvente no interior da estufa, isto é, quanto a concentração do solvente ultrapassa o valor de ajuste, o *dampers* permite maior vazão de entrada de ar fresco. Da mesma forma, a vazão do ar de processo (recirculação) é controlada por um *dampers* que trabalha inversamente proporcional ao diferencial de pressão à montante e à jusante do *dampers* de ar fresco, ou seja, quando a vazão de entrada de ar fresco é diminuída, o *dampers* de recirculação permite o aumento proporcional da vazão de ar de processo. Este esquema de controle permite economia de energia de aquecimento do ar.

A vazão do exaustor é controlada com o objetivo de garantir uma vazão segura de entrada de ar fresco e também manter a pressão no interior da estufa ligeiramente negativa, segundo um ajuste estabelecido. Um esquema de controle típico de uma zona de estufa é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Esquema de controle de uma zona da estufa.



Fonte: [3].

### C. Configuração geométrica da estufa

Para projetar uma estufa de maneira apropriada é necessário o conhecimento de algumas particularidades dos adesivos e de uma revisão dos tipos de estufas existentes.

Os adesivos utilizados em fitas adesivas são polímeros naturais ou sintéticos que se apresentam nos seguintes formatos antes do processo de revestimento: 1. Solução em solvente orgânico e inflamável; 2. Emulsão em água; e 3. Sem solvente.

Os adesivos em solução e em emulsão passam pela estufa para a evaporação do meio líquido, enquanto os adesivos sem solvente podem passar pela estufa para ativar, com o calor transferido, algum componente de sua formulação, [4]. A tendência mundial é a substituição dos adesivos à base de solventes orgânicos por emulsões ou por adesivos sem solvente. Além da vantagem de não agressão ao meio ambiente, a secagem de emulsões envolve vazões muito menores de exaustão (e ar fresco), pois o vapor de água evaporado não precisa dos níveis de diluição dos vapores de solventes orgânicos. Estes últimos necessitam de ar de diluição suficiente para que sua concentração esteja abaixo do limite de inflamabilidade.

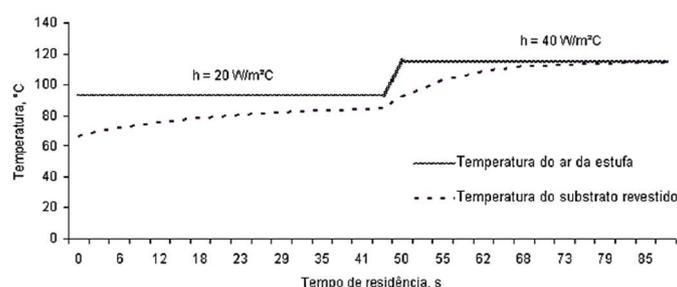
Como mencionado anteriormente, existem inúmeros tipos de estufa que são utilizadas em cobrideiras. Um critério de classificação possível é a direção do fluxo de ar em relação ao substrato que flui pelo interior da estufa. De acordo com esta classificação, há os seguintes tipos de estufa [4]:

1. Fluxo paralelo: o fluxo de ar de processo para evaporação do solvente viaja paralelamente ao substrato;
2. Fluxo perpendicular – Jatos de impacto (*Impingement Jet*): o fluxo de ar de processo, vindo de bocais de formatos variados, incide perpendicularmente ao substrato na face superior. Há necessidade de rolos que suportem o substrato durante sua viagem no interior da estufa. A presença destes rolos permite que altas vazões de ar possam ser usadas na secagem.
3. Flutuação por colchão de ar (*Air Flotation*): o fluxo de ar de processo incide nas faces superior e inferior do substrato de maneira balanceada e cria um colchão que suporta o substrato. Não há necessidade de rolos no interior da estufa.

Em geral, uma aceleração considerável do processo de secagem é conseguida nas estufas que apresentam um alto valor do coeficiente de transferência de calor, pois, neste caso, a temperatura do substrato se aproxima mais rapidamente da temperatura do ar quente e a quantidade de solvente evaporada por metro de estufa é maximizada em decorrência do aumento da pressão parcial do solvente na superfície do líquido.

A Figura 3 ilustra a importância do coeficiente de transferência de calor na elevação da temperatura do substrato revestido para uma mesma diferença inicial de temperatura entre o ar e o substrato revestido. Observa-se que o aumento do coeficiente de transferência de calor faz com que a temperatura do substrato revestido se aproxime mais rapidamente da temperatura do ar. Esta é uma característica das estufas de alta eficiência de transferência de calor.

Figura 3 – Efeito do coeficiente de transferência de calor na curva de temperatura do substrato revestido para uma diferença inicial de temperatura entre o ar e o substrato revestido de 25 °C.



Fonte: Adaptado de [4].

O aumento do coeficiente de transferência de calor é benéfico para o processo de secagem desde que a evaporação rápida do solvente na superfície do adesivo não crie uma barreira que impeça a difusão do solvente das camadas inferiores à superfície do adesivo e daí para o ar, conforme abordado por [4].

Tendo em vista estas informações o projeto de uma estufa de secagem de fitas adesivas que cumpra sua função no processo, é necessária a determinação das seguintes informações:

- O tipo de estufa, comprimento total L e o número de zonas independentes de controle de temperatura;
- A vazão de exaustão necessária em cada zona, por consequência, o dimensionamento do exaustor em cada zona;
- A vazão do ar de recirculação (capacidade do recirculador em m³/h), a posição do fluxo de ar em relação ao substrato e a geometria interna da estufa (tipo de estufa). O agrupamento destes parâmetros determina o coeficiente de transferência de calor da estufa.

As informações básicas para se chegar ao dimensionamento final da estufa são relacionadas a seguir:

- Velocidade objetivo para o substrato na cobrideira v, geralmente dada em m/min;
- A largura do revestimento D, geralmente dada em metros;

- Quantidade de solvente (orgânico ou água) a ser evaporado por metro quadrado do substrato S, geralmente dado em g/m<sup>2</sup>;
- O solvente do adesivo;
- A temperatura do ar em cada zona da estufa.

#### D. Mecanismos físicos que fundamentam os modos de transferência de calor para a medição das perdas pelas paredes da estufa

Em [1], descreve-se o mecanismo de convecção externa forçada que fundamenta o modo de transferência de calor para as estufas de secagem de fitas adesivas. A convecção é o processo de transferência de calor executada pelo escoamento do fluido, que atua como agente transportador da energia que é transferida da parede (ou para a parede). A transição entre a temperatura da parede ( $T_p$ ) e a temperatura do fluido ao longe ( $T_\infty$ ) ocorre na região do escoamento, que recobre a parede sólida e que é denominada de camada limite. Nesta região do escoamento, a velocidade decresce do valor referente ao longe para o valor nulo na superfície da parede. Para a determinação da perda é analisada a taxa de transferência de calor ( $q$ ) entre a superfície sólida e o fluido e como ela é afetada por estas temperaturas extremas ( $T_p$ ,  $T_\infty$ ) e pelo escoamento. Tomando-se como base a unidade de área ( $A$ ), verificou-se em [1] a relação entre o fluxo de calor ( $q''$ ) e as temperaturas extremas e o escoamento. Em resumo, o tratamento tradicional para este problema consiste em definir primeiramente o coeficiente de transferência de calor externo ( $h$ ) tendo como base as Equações 1, 2 e 3:

$$q'' = \frac{q}{A} \quad (1)$$

$$\frac{q}{A} = h(T_p - T_\infty) \quad (2)$$

$$h = \frac{q}{A} \cdot \frac{1}{(T_p - T_\infty)} \quad (3)$$

#### E. Coeficiente de transferência de calor em estufas

Em [5] é apresentada uma investigação experimental da transferência de calor em um escoamento de ar perpendicular a um substrato. Um interessante aparato foi desenvolvido para a estimativa do coeficiente de transferência de calor entre o ar e a superfície. Este aparato é formado por um bocal de seção circular de onde escoava uma vazão controlada de ar a 30 ° C. Esta vazão de ar colide perpendicularmente em uma superfície de vidro de espessura e propriedades conhecidas. Tal superfície consiste na tampa de um compartimento que tem vapor de água à pressão constante em seu interior, mantendo a superfície inferior da placa de vidro em temperatura constante. Já na superfície superior, a temperatura é medida por uma

câmara de infravermelho, que permite um mapa local de temperatura. A distância entre a saída do bocal e a superfície de vidro pode ser ajustada de 0,5 a 10 diâmetros do bocal. Com o conhecimento do gradiente de temperatura na placa de vidro em cada ponto da superfície e das propriedades do vidro, é possível calcular o fluxo de calor local. Com base no fluxo de calor e a diferença de temperatura entre a superfície superior do vidro e o ar é possível então calcular o coeficiente de transferência de calor local e médio. Gráficos de coeficiente de transferência de calor em função da distância do ponto de estagnação do escoamento para diferentes distâncias bocal-superfície e do número de Reynolds são mostrados e discutidos no trabalho.

Em [6] o mesmo aparato experimental descrito em [5] foi utilizado para estudar o efeito (no valor do coeficiente local de transferência de calor) de uma vazão de ar pulsante com frequência controlada na saída do bocal. A conclusão foi que, em geral, o coeficiente de transferência de calor decresce se houver uma pulsação na vazão de ar, a menos que a distância do bocal ao substrato seja menor que um valor de referência verificado experimentalmente.

De forma geral, a transferência de calor  $q$ , em W, do ar com temperatura  $T_a$  para o substrato revestido com temperatura  $T$  é descrita na Equação 4. O coeficiente de transferência de calor  $h$  é dado em W/m<sup>2</sup> °C, sendo a área de transferência de calor dada em m<sup>2</sup>.

$$q = hA(T_a - T) \quad (4)$$

Para uma área  $A$  unitária, verifica-se que a transferência de calor  $q$  aumenta quando o coeficiente de transferência de calor é aumentado e/ou quando a diferença de temperatura entre o ar e o substrato revestido ( $T_a - T$ ) se mantém elevada. Logicamente, a diferença de temperatura entre o ar e o substrato revestido diminui à medida que o substrato revestido viaja no interior da estufa. Com o objetivo de manter ( $T_a - T$ ) elevada são adicionadas outras zonas onde a temperatura do ar ( $T_a$ ) é maior que a da zona anterior.

Vários autores estudaram o processo de secagem de solventes em misturas solvente-polímero com o objetivo de propor parâmetros ótimos de ajuste de temperatura e coeficientes de transferência de calor em cada zona da estufa para redução do tempo de secagem. Em [7] é proposto um modelo matemático para a simulação do processo de secagem de soluções poliméricas. Tal modelo foi empregado em [4] para simulação do processo de secagem de fitas adesivas por meio da resolução simultânea das equações diferenciais de conservação da massa e energia e condições de contorno e iniciais adequadas.

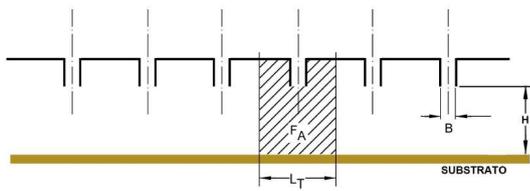
A seguir, são apresentados modelos (empíricos) que foram propostos na literatura para prever o coeficiente de transferência de calor para uma dada geometria de escoamento de fluido sobre um sólido.

### Fluxo de ar de processo perpendicular ao substrato

Como mencionado em [2], os modelos propostos para estimativa do coeficiente de transferência de calor em estufas são baseados em parâmetros geométricos e condições experimentais e são válidos para um único ou vários bocais de insuflação tipo fenda e tipo orifício.

Um esquema para estufas de fluxo perpendicular ao substrato com bocais de insuflação tipo fenda (*slot nozzle*) é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Variáveis geométricas de uma estufa de fluxo de ar de processo perpendicular ao substrato e bocais tipo fenda slot nozzle.



Fonte: Adaptado de [2].

Para este equipamento, são propostas as Equações 5 e 6 para a determinação do coeficiente de transferência de calor.

$$f_0 = [60 + 4(H/S - 2)^2]^{-1/2} \quad (5)$$

$$N_{u} = \frac{h(2B)}{k} = \frac{2}{3} f_0^{3/4} P_r^{0,42} \left( \frac{2 Re}{f_0 + f} \right)^{2/3} \quad (6)$$

nas quais  $f = \frac{B}{L_t}$  é a relação entre a largura do bocal  $B$  e a distância entre bocais  $L_t$ ,  $f_0$  é função da distância entre o bocal e o substrato  $H$  e do diâmetro hidráulico do bocal  $S = 2B$  e dado pela Equação 5. O número de Reynolds  $Re = \rho v S / \mu$  é calculado em função da velocidade média do ar na saída do bocal  $v$  e do diâmetro hidráulico  $S = 2B$ . A aderência deste modelo a dados experimentais é comprovada em [2].

### Cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção da estufa sobre o substrato

Segundo [8] e [9], para o cálculo do coeficiente de transferência de calor é necessária a determinação da temperatura do substrato ( $T_x$ ) em cada ponto  $x$  ao longo do comprimento da estufa (gerando a curva de temperatura  $T$  considerando todos os pontos  $x$ , em relação ao tempo). A expressão para cálculo deste coeficiente é obtida pelo balanço de energia em uma área unitária em redor de cada ponto do substrato, com densidade  $\rho$ , calor específico  $c_p$ , espessura do substrato  $z$  e temperatura do ar da estufa  $T_a$ , conforme apresentado na Equação 7.

$$h(T_a - T) = \rho c_p z \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

Devido a variações espaciais do fluxo de ar no interior da estufa, é esperado que o coeficiente de transferência de calor não seja constante ao longo do equipamento. Porém, esta variação do coeficiente de transferência de calor por convecção  $h$  é mínima. Portanto, assume-se que  $h$  seja constante, dado por um valor médio dentro da mínima variação.

A expressão da Equação 7 pode ser integrada de um tempo  $t_0 = 0$  (com temperatura do substrato  $T_0$ ) até um tempo  $t$  (com temperatura do substrato  $T$ ), como na Equação 8 (com  $T^*$  uma variável auxiliar), resultando na Equação 9.

$$\frac{\bar{h}}{\rho c_p z} \int_0^t dt = \int_{T_0}^T \frac{dT^*}{T_a - T^*} \quad (8)$$

$$-\frac{\bar{h}}{\rho c_p z} t = \ln \left( \frac{T - T_a}{T_0 - T_a} \right) \quad (9)$$

O tempo  $t$  está relacionado com a velocidade  $v$  do substrato e a distância  $x$  viajada dentro da estufa por:

$$t = \frac{x}{v} \quad (10)$$

Portanto, a expressão para o cálculo do coeficiente de transferência de calor  $h$  em função da posição  $x$  dentro da estufa, onde o substrato tem temperatura  $T_x$  é dada pela Equação 11:

$$-\frac{\bar{h}x}{\rho c_p z v} = \ln \left( \frac{T_x - T_a}{T_0 - T_a} \right). \quad (11)$$

A partir desta expressão é possível traçar um gráfico do coeficiente de transferência de calor  $h$  em função da posição ao longo da estufa,  $x$ . Esta forma de determinação para  $h$  pode ser aplicado em todos os tipos de estufa e gerará os valores para comparação entre os diferentes tipos de estufa.

É possível comparar o valor experimental do coeficiente  $h$  de transferência de calor da Equação 9 ao valor previsto pelo modelo proposto por [2]. Para tanto, é necessária a medição de características dimensionais da estufa. Conhecidos estes parâmetros, é possível determinar o coeficiente de transferência de calor pelo modelo da Equação 12 e criar uma tabela de correlação com os valores medidos.

$$-\frac{\bar{h}x}{\frac{m}{A} c_p v} = \ln \left( \frac{T_x - T_a}{T_0 - T_a} \right). \quad (12)$$

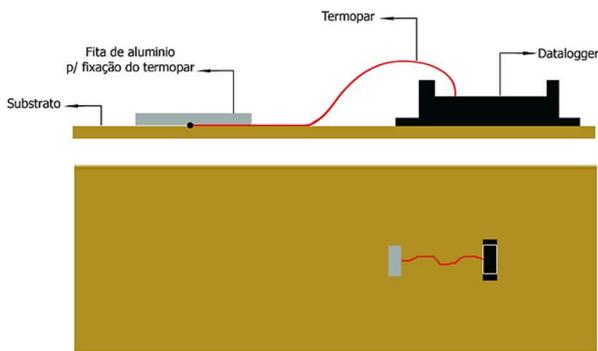
### III. METODOLOGIA

#### A. Medições de transferência de calor para o substrato utilizando-se fita de alumínio para a fixação do termopar

A informação experimental básica para obtenção do coeficiente  $h$  de transferência de calor da estufa sobre o substrato é a curva de temperatura do substrato durante a passagem na estufa. Portanto, considerando-se uma determinada estufa e mantendo-se todos os parâmetros experimentais constantes como a temperatura e a vazão do ar de processo, a velocidade do substrato, o tipo e espessura da fita de fixação do termopar, o equipamento e procedimento de medição, é esperado que a variabilidade entre as diferentes curvas de temperatura obtidas seja mínima.

O arranjo experimental para determinação da curva de temperatura está ilustrado na Figura 5 e o método experimental está descrito a seguir:

Figura 5 – Esquema do arranjo experimental para determinação da curva de temperatura.



Fonte: Autores.

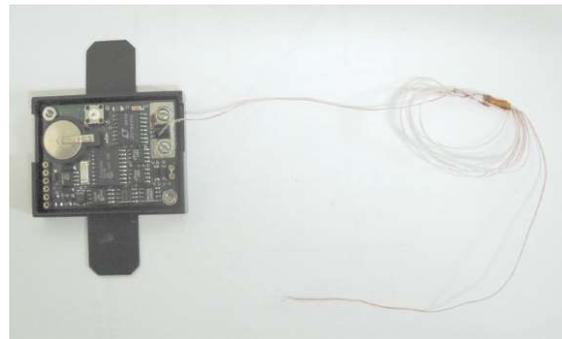
Passo 1. Definição da temperatura e a vazão do ar de processo a ser utilizado no experimento. Logicamente, a temperatura e vazão do ar de processo são variáveis importantes para a determinação da curva de temperatura do substrato. A temperatura do ar de processo é ajustada diretamente no controlador da estufa, enquanto a vazão está relacionada com a velocidade do motor do recirculador. Para estufa tipo Jato de Impacto (*Impingement Jet*), após o ajuste da velocidade do motor do recirculador, mede-se a pressão estática  $P_s$  em Pa na caixa (plenum) de insuflação e calcula-se a velocidade do ar de processo  $va$  em m/s na saída dos bocais utilizando o princípio de Bernoulli, dado por  $va = \frac{\sqrt{2P_s}}{\rho}$ , onde  $\rho$  é a densidade do ar de processo em  $kg/m^3$ .

Passo 2. Definição da fixação do termopar na superfície do substrato, sua espessura e velocidade de

passagem na estufa. Devido a forma como a medição da temperatura do substrato é feita, vide Figura 4, a propriedade de difusividade térmica  $\alpha = \frac{\kappa}{\rho C_p}$  da fita de fixação do termopar e sua espessura determinam o tempo de resposta da medição de temperatura. É necessário que o material da fita de fixação tenha alta difusividade térmica para evitar atrasos na medição. Neste estudo é utilizada fita de alumínio de espessura  $0,087 \times 10^{-3}$  m. A velocidade do substrato define o tempo de residência na estufa, sendo, portanto, muito importante para definição da curva de temperatura.

Passo 3. Preparação do equipamento de aquisição de dados (*data logger*). A temperatura do substrato é medida por um termopar tipo J conectado a um sistema de aquisição de dados. A Figura 6 mostra o equipamento completo utilizado para a medição da curva de temperatura do substrato com resolução de décimos de graus Celsius. O equipamento é fixado com fita adesiva sobre o substrato, enquanto a extremidade do termopar é fixada com fita de alumínio adesivada na parte superior do substrato.

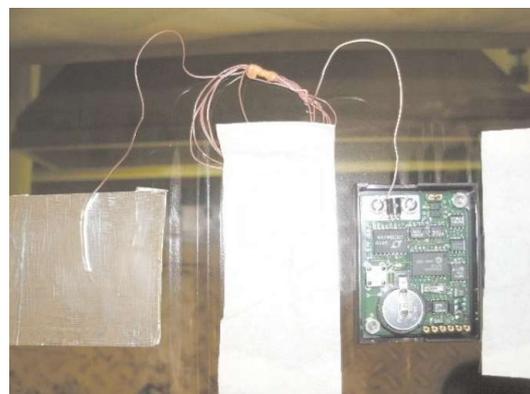
Figura 6 – Equipamento para medição de temperatura do substrato.



Fonte: Autores.

A Figura 7 ilustra a maneira como o equipamento de medição é fixado no substrato e viaja com o mesmo pelo interior da estufa.

Figura 7 – Fixação do equipamento de medição de temperatura no substrato com fita de alumínio.



Fonte: Autores.

NOGUEIRA, J. X.; SANCHEZ, C. G.; PEREZ, E. B.

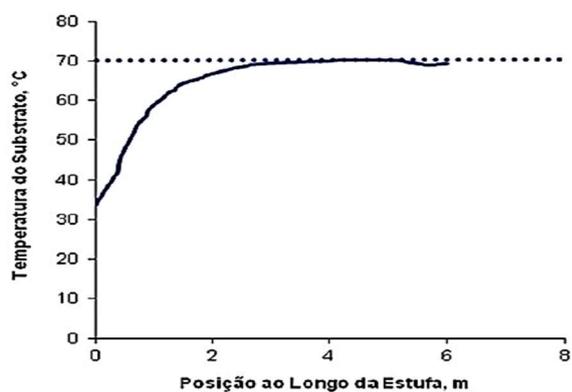
*Avaliação do coeficiente de transferência de calor de estufa de secagem de fitas adesivas do tipo fluxo de ar de processo perpendicular ao substrato*

©Revista Ciência e Tecnologia, Campinas, v. 21, n. 38, p. 65-76, jan./jun. 2018 - ISSN: 2236-6733

Passo 4. Aplicação do equipamento de medição de temperatura pela estufa na velocidade determinada. O equipamento de medição de temperatura possui um botão que inicia a coleta de dados com intervalo mínimo entre amostras de 0,025 s ou maior. Após o substrato ser posto em movimento na velocidade desejada, este botão é acionado e a coleta de dados é iniciada. Depois que o equipamento de medição deixa a estufa, o mesmo botão é acionado novamente para terminar a coleta de dados.

Passo 5. Transferência de dados do equipamento de medição para o computador. O equipamento de medição de temperatura se comunica com o computador através de uma saída serial e um software especialmente desenvolvido para o equipamento. Cada corrida de medições é transferida para arquivo texto que pode ser editado em uma planilha Excel. A partir disso, a curva de temperatura é obtida com os recursos gráficos deste aplicativo. A Figura 8 ilustra uma curva típica de temperatura do substrato obtida pelo método experimental descrito, para a velocidade no bocal de 9,9 m/s.

Figura 8 – Curva típica de temperatura obtida pelo método experimental descrito.

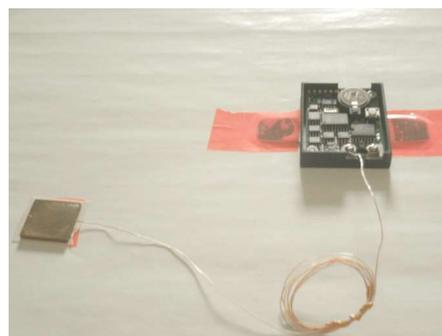


Fonte: Autores.

#### B. Medição de transferência de calor pela utilização de outros materiais de fixação do termopar

Considerando-se a mesma estufa e mantendo constantes todos os parâmetros experimentais de temperatura e vazão do ar de processo, velocidade do substrato, equipamento e procedimento de medição, é necessário avaliar as possíveis alterações obtidas a partir da modificação do material de fixação do termopar na superfície do substrato. O objetivo é entender a modificação nos resultados obtidos supondo que ao invés de empregar fita de alumínio na fixação do termopar (seção anterior, Figura 7), uma placa de cobre fosse utilizada para a função, conforme Figura 9.

Figura 9 – Arranjo experimental para determinação da curva de temperatura placa de cobre.



Fonte: Autores.

É esperado que os resultados sejam melhores devido a difusividade térmica da placa de cobre ser maior que a difusividade térmica da fita de alumínio.

O procedimento para as medidas emprega os mesmos parâmetros para a temperatura e vazão de ar de processo e repete os passos de 1 a 5 já mencionados na subseção III.A. São necessários ajustes apenas no Passo 2, referentes às especificações da placa de cobre, de espessura 0,002 m, largura 0,02 m e comprimento 0,02 m.

#### C. Validação do método experimental de medição da curva de temperatura do substrato

Um plano para validação do método de medição da curva de temperatura do substrato foi desenvolvido para verificar sua robustez. Baseia-se, primeiramente, na calibração do equipamento de medição de temperatura e, em seguida, em um teste de hipótese entre dois conjuntos de dados.

A calibração do equipamento de medição ilustrado na Figura 6, foi realizada pela empresa IS Metrologia e Serviços Tecnológicos Ltda, conforme a norma número ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005 – INMETRO com certificado de calibração.

O teste de hipótese foi desenvolvido no software estatístico Minitab, que gera um intervalo de confiança para a diferença da média dos dois conjuntos de dados. Se o zero estiver contido neste intervalo, aceita-se a hipótese de que os dois conjuntos possuem médias iguais e, portanto, pertencem à mesma população.

Dois processos de medições de temperatura conforme o método especificado foram realizados, com 5 repetições em cada. O objetivo é comparar a temperatura do substrato em uma mesma posição da estufa entre as medições dos dois processos. É esperado que fixando as condições experimentais e os parâmetros, não haja diferença significativa entre as temperaturas medidas num mesmo ponto da estufa.

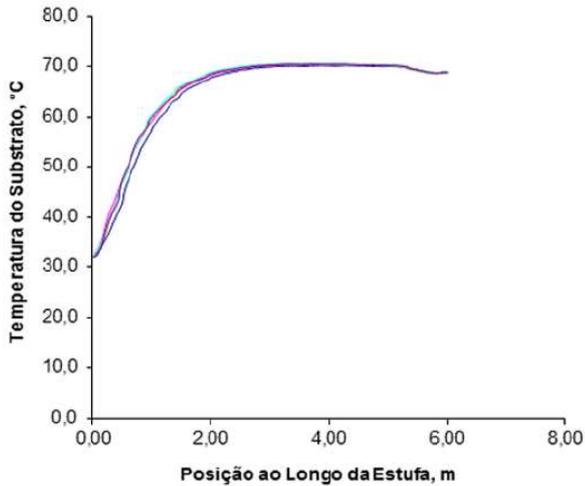
A validação foi realizada em uma estufa industrial tipo Jato de Impacto (*Impingement Jet*), sob as condições experimentais descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições experimentais para validação do método de medição da curva de temperatura

Temp. ar processo	Pressão plenum insuflação	Veloc. ar processo	Veloc. substrato
70 °C	5 mmH <sub>2</sub> O	9,9 m/s	10 m/min.

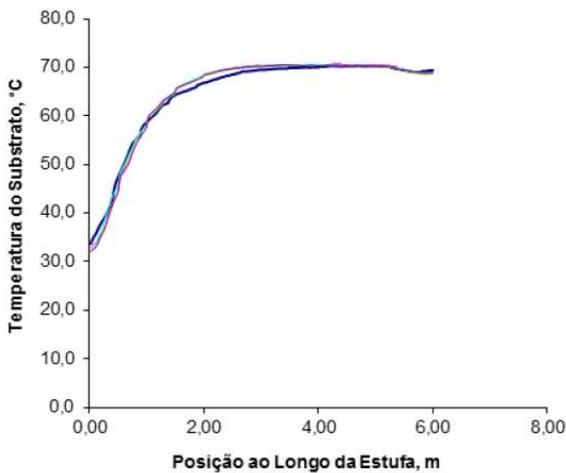
As Figuras 10 e 11 ilustram as 5 medições feitas em cada uma das duas repetições. Observa-se que as curvas apresentam boa aderência.

Figura 10 – Curvas de temperatura (5 observações) para o 1º processo de medição, para velocidade no bocal de ar de processo de 9,9 m/s



Fonte: Autores.

Figura 11 – Curvas de temperatura (5 observações) para o 2º processo de medição para velocidade no bocal de ar de processo de 9,9 m/s



Fonte: Autores.

Fixando-se a temperatura a 2 m do início da estufa como um ponto de comparação entre as medições obtidas nos dois processos, foi realizado o teste de hipótese com o conjunto de dados da Tabela 2.

Tabela 2 – Conjunto de dados para teste de hipótese: temperatura do substrato a 2 m da entrada da estufa

Observação	Temp. medida no 1º processo	Temp. medida no 2º processo
1	66,8	67,7
2	68,5	68,2
3	68,2	68,6
4	68,5	68,8
5	68,3	68,5

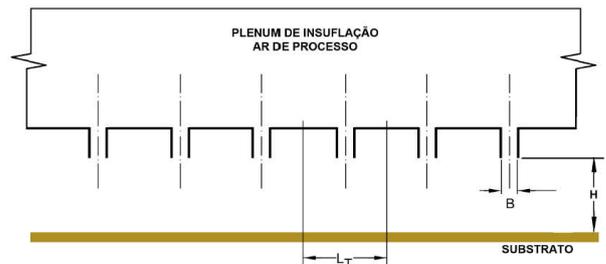
O resultado da análise no Minitab mostra um intervalo de confiança para a diferença das médias das temperaturas tomadas no 1º e 2º processo de medição. Este intervalo incluiu o zero, portanto assumimos que o método experimental é robusto e deve apresentar resultados consistentes. A partir de verificação do método experimental, foi então realizada a medição da temperatura do substrato utilizando sistema de aquisição de dados (*data logger*), tanto para o caso em que o termopar é fixado com fita de alumínio na superfície do substrato o cálculo, quanto para o caso o termopar fixado a uma placa de cobre que está sobre o substrato. O objetivo é o cálculo do coeficiente de transferência de calor, a partir das Equações 11 e 12.

#### IV. RESULTADOS

Em relação à avaliação do coeficiente de transferência de calor sobre o substrato seco para uma estufa de secagem de fitas adesivas, determinou-se que, para as características do problema em questão, a geometria da estufa com fluxo de ar de processo perpendicular ao substrato (bocal de insuflação tipo fenda) deveria ser empregada.

A Figura 12 ilustra todos os parâmetros geométricos dessa estufa que são necessários para o cálculo do coeficiente de transferência de calor pelo modelo proposto por [2].

Figura 12 – Parâmetros geométricos da estufa de fluxo de ar de processo perpendicular ao substrato e bocal de insuflação tipo fenda.



Fonte: Autores.

A Tabela 3 apresenta os valores numéricos destes parâmetros enquanto condições experimentais empregadas para este tipo de estufa, [10].

Tabela 3 – Valores numéricos dos parâmetros geométricos da estufa da Figura 12.

Largura da fenda	Distância bocal-bocal	Distância bocal-substrato
$B$ (mm)	$L_T$ (mm)	$H$ (mm)
22	100	72

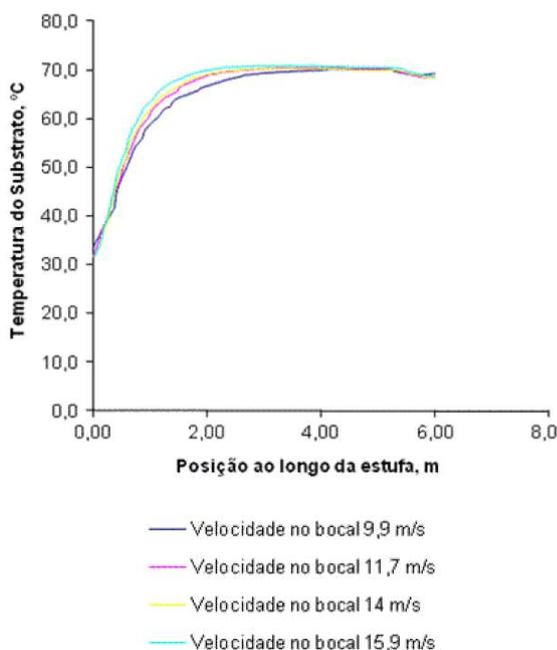
Tendo como base as definições experimentais, foram realizados os testes referentes a variações em parâmetros do sistema, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Condições experimentais para a estufa da Figura 12.

Amostra	Pressão plenum ar processo mmH <sub>2</sub> O	Veloc. ar processo m/s	Temp. ar processo °C	Veloc. substrato m/min
1	5	9,9	70	10
2	7	11,7	70	10
3	10	14,0	70	10
4	13	15,9	70	10

As curvas de temperatura para cada condição experimental da Tabela 3 são mostradas na Figura 13 a fim de ilustrar as mudanças em sua forma em decorrência das mudanças nas condições experimentais.

Figura 13 – Curvas de temperatura do substrato em função da posição na estufa de fluxo de ar de processo perpendicular ao substrato e bocal de insuflação tipo fenda para as condições experimentais da Tabela 3.



Fonte: Autores.

Observa-se que quanto maior a velocidade do ar na saída do bocal, mais rápido a temperatura do substrato se aproxima da temperatura do ar de processo. Este comportamento indica que uma velocidade do ar maior na saída do bocal gera um aumento no coeficiente de transferência de calor. Conforme descrito, o procedimento adotado para a medição da temperatura do substrato assim como o tipo de material utilizado para a fixação do termopar (considerando a espessura) influenciam nas respostas obtidas nos processos e no tempo para a apresentação delas. Conforme também mencionado anteriormente, é necessário que o material utilizado na fixação tenha alta difusividade térmica para evitar atrasos na medição.

Para ilustrar, na Figura 14 apresenta-se as informações sobre o cálculo do coeficiente de transferência de calor em um caso onde a fita de alumínio foi empregada na fixação do termopar. Tal cálculo resultou em um coeficiente (médio) de 20 W/m<sup>2</sup> °C.

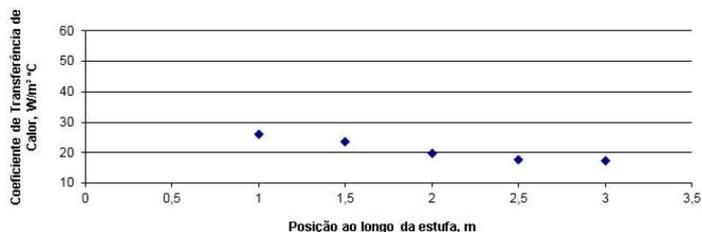
Figura 14 – Cálculo do coeficiente de transferência de calor com termopar fixado com fita de alumínio.

CONFIGURAÇÃO DO COLETOR DE DADOS		
Segundos / Amostra:	0,1	
DADOS DE ENTRADA		
Temperatura do Ar (°C):	70 Ajustada	
Temp. Inicial do Substrato (°C):	30,5 F3 (Leitura coletor de dados - 5 Plenum cima 1)	
Densidade Fita de Alumínio (g/cm <sup>3</sup> ):	2,7 Alumínio internet	
Calor específico Alumínio (kJ/kg °C):	0,88 Alumínio internet	
Espessura da Fita Alumínio (mm):	0,035 Fita 419 Alumínio medida micrômetro	
Velocidade do Substrato (m/min):	10 Ajustada	
DADOS DE SAÍDA		
Posição ao longo da estufa (m)	Temp. Substr. (°C)	Coef. de Transferência de Calor (W/m <sup>2</sup> °C)
1	69,40	26
1,5	66,9	24
2	67,7	20
2,5	68,4	18
3	69,1	17

Fonte: Autores.

A Figura 15 apresenta o comportamento do coeficiente de transferência de calor ao longo da estufa, no caso do termopar fixado com fita de alumínio.

Figura 15 – Gráfico do coeficiente de transferência de calor em função da posição ao longo da estufa, com o termopar fixado a uma fita de alumínio.



Fonte: Autores.

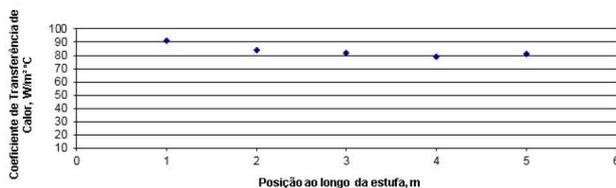
As Figuras 16 e 17 representam análise similar, mas para o caso do termopar fixado em placa de cobre. Neste caso, o coeficiente de transferência de calor médio calculado foi de 83 W/m<sup>2</sup> °C.

Figura 16 – Cálculo do coeficiente de transferência de calor com termopar fixado à placa de cobre.

CONFIGURAÇÃO DO COLETOR DE DADOS		
Segundos / Amostra:	0,1	
DADOS DE ENTRADA		
Temperatura do Ar (°C):	70	Ajustada
Temp. Inicial do Substrato (°C):	35,1	F4(Leitura coletor de dados - 15 Plenum cima 1)
Massa da Placa de Cobre (kg):	0,00726	Balança digital
Calor Específico do Cobre (J/kg °C):	390	
Área de troca de calor com a placa (m²):	0,0004	
Velocidade do Substrato (m/s):	0,16	Ajustada
DADOS DE SAÍDA		
Posição ao longo da estufa (m)	Temp. Substr. (°C)	Coef. de Transferência de Calor (W/m² °C)
1	37,8	91
2	39,9	84
3	41,9	82
4	43,6	79
5	45,6	81

Fonte: Autores.

Figura 17 – Gráfico do coeficiente de transferência de calor em função da posição ao longo da estufa, com o termopar fixado a uma placa de cobre.



Fonte: Autores.

Na Figura 18 são apresentadas as etapas para o cálculo do coeficiente de transferência de calor médio estimado pelo modelo baseado na geometria da estufa.

Figura 18 – Cálculo do coeficiente de transferência de calor baseado na geometria da estufa.

Campos em vermelho são dados solicitados	
<b>Velocidade no Bocal de Ar (m/s)</b>	
Queda de Pressão Estática no Bocal (mm H2O) - P	15
Temperatura do Ar (Bulbo Seco) °C:	70
Densidade do Ar (kg mix / m³ mix):	1,025
Velocidade no bocal de Ar (m/s) - V	17,2
<b>Reynolds</b>	
Largura do Bocal Tipo Fenda (m) - B	0,022
Veloc. no Bocal de Ar (m/s) - w	17,2
Diâmetro Hidráulico no Bocal (m) - S	0,044
Viscosidade Cinemática do Ar a 70 °C (m²/s) - v	2,07E-05
Re	37521
Intervalo de Validade de 1500 à 40000	
<b>Prandtl 70 °C (air)</b>	0,708
<b>Fator f</b>	
Bocal para Bocal (m) - Lt	0,1
f	0,22
Intervalo de Validade de 0,008 à	0,3224767
<b>Fator f<sub>0</sub></b>	
Bocal para Teia (Substrato) (m) - H	0,081
f <sub>0</sub>	0,1289907
<b>Intervalo de validade H / S [1; 40]</b>	
H/S	1,8409091

<b>Nusselt</b>	
Nu	127
<b>Coefficiente de Transferência de Calor (W / m² C) - h</b>	
Conductividade térmica do ar a 70 °C (W / mK) - k	0,0292
Coefficiente de transferência de calor (W / m² C) - h	84
Coefficiente de transferência de calor (BTU/hr ft² F) - h	14,9
<b>COMPARAÇÃO PARA PROJETO IDEAL</b>	
Altura do bocal (m) - Ak	0,06
Comprimento do bocal (m) - 2l	1,7
<b>Projeto para velocidade uniforme do ar através do comprimento do bocal</b>	
Projeto ideal para a área de saída relativa f <sub>a</sub> >3	
Projeto ideal para o número de jatos na área de saída: melhor inferior a 7	
A f <sub>a</sub> mais baixa causará uma menor velocidade do ar no centro do bocal tipo fenda do que as extremidades	
Maior l / Lt reduzirá o coeficiente de transferência de calor	
Área de saída relativa - f <sub>a</sub>	0,7
Número de jatos na área de saída - l/Lt	8,5
<b>Projeto para o coeficiente de transferência de calor máximo em qualquer velocidade de ar</b>	
Bocal para Teia (Substrato) (m) - H	0,081
Largura do bocal tipo fenda (m) - B	0,0081
Bocal para bocal (m) - Lt	0,1134

Fonte: Autores.

## V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos parâmetros geométricos da estufa e as condições experimentais das amostras da Tabela 4, o modelo proposto nos dá uma estimativa de 84 W/m² °C, de acordo com o modelo proposto em [10], para o valor médio do coeficiente de transferência de calor. Pela metodologia experimental proposta, ou seja, a medição do coeficiente de transferência de calor com o termopar fixado a uma placa de cobre que está sobre o substrato, o valor médio para o coeficiente de transferência de calor foi de 83 W/m² °C (Figura 16). Portanto, a diferença entre o valor estimado pelo modelo baseado na geometria da estufa e o valor medido pelo processo proposto é de 1,19 %. Tendo em vista os erros dos procedimentos experimentais e instrumentos de medida, considera-se que o resultado obtido é aderente à informação da literatura e fabricantes para estufas tipo fluxo perpendicular com bocal de insuflamento tipo fenda.

A metodologia para a determinação do coeficiente de transferência de calor é uma ferramenta útil para fornecer dados importantes para simulação do processo de secagem. Entre todas as variáveis envolvidas no processo de secagem (temperatura, tempo de residência, propriedades térmicas de substratos, dentre outras), o coeficiente de transferência de calor é o de mais difícil determinação, havendo consequências importantes de uma determinação equivocada: coeficientes altos em uma estufa, faz a temperatura do substrato atingir rapidamente a temperatura do ar aquecido; em estufa de queima direta, o queimador fornece a energia necessária para aquecimento do ar através da combustão e deve ser dimensionado para que sua potência seja suficiente para que o ar atinja a temperatura de processo.

## REFERÊNCIAS

- [1] BEJAN, A., **Advanced engineering thermodynamics**, Wiley & Sons, 1996.
- [2] MARTIN, H., Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces. **Advances in Heat Transfer**, n. 13, 1977.
- [3] 3M, Standard for ovens and dryers. **3M Engineering Occupational Safety and Health Standard**, n. 2, 2002.
- [4] PEREZ, E. B.; CARVALHO, M. S., Drying of thin films of polymer solutions coated over impermeable substrates. **Heat Transfer Engineering**, n. 28, pp. 559-566, 2007.
- [5] HOFMANN, H. M.; KIND, M.; MARTIN, H., Measurements on steady heat transfer and flow structure and new correlations for heat and mass transfer in submerged impinging jets, **J. Heat Mass Transfer**, n. 50, pp. 3957 - 3965, 2007.
- [6] HOFMANN, H. M.; MOVILEANU, D. L.; KIND, M.; MARTIN, H., Influence of pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets, **J. Heat Mass Transfer**, n. 50, pp. 3638 - 3648, 2007.
- [7] CAIRNCROSS, R. A., **Solidification phenomena during drying of sol-to-gel coatings**. PhD thesis, University of Minnesota, 1994.
- [8] PRICE, P.; CAIRNCROSS, R. A., Optimization of single-zone drying of polymer solution coatings using mathematical modeling. **Polymer Science**, n. 78, p. 149, 2000.
- [9] PRICE, P.; CAIRNCROSS, R. A., Multicomponent diffusion theory and its application to polymer-solvent systems. **AIChE Journal**, v. 49 n. 2, p. 309, 2003.
- [10] NPFA 86 - **Ovens and furnaces - design, location and equipment**, 2011.