

## 4 Otimização do processo de secagem

Nesta dissertação otimização significa redução do tempo de residência do revestimento em estufa, mantendo-se o nível de solvente residual dentro da especificação e sem gerar defeitos na camada revestida.

Entre os defeitos possíveis, a formação de bolhas é o mais comum durante a secagem de soluções poliméricas. Conforme já mencionado anteriormente, este tipo de defeito é previsto pelo simulador de secagem.

A partir de agora vamos considerar que a fase líquida revestida sobre o substrato é *um adesivo formado por um polímero em solução de um ou dois solvente*. Esta diminuição da abrangência visa à apresentação de maiores detalhes deste tipo de revestimento. A teoria apresentada até aqui ainda continua válida para uma fase líquida qualquer.

Muitas vezes o processo de secagem é o gargalo na manufatura de fitas adesivas devido aos altos pesos de revestimento ( $>10\text{g/m}^2$ ) e às baixas porcentagens de sólidos ( $< 50\%$ ) típicas da maioria dos adesivos em solução.

Além do cuidado necessário para evitar o aparecimento de bolhas, podem existir outras variáveis não previstas no modelo proposto, que afetam a otimização do processo de secagem.

Substratos constituídos por alguns filmes poliméricos— polietileno, polipropileno, PVC— têm baixa resistência à temperatura e assim restringem a gama de opções de ajuste dos parâmetros que o engenheiro de processos tem para aumento da produtividade do processo de secagem.

A concorrência entre secagem e reação química dentro da solução polimérica é um outro fator importante, pois geralmente a reação química muda a termodinâmica da interação entre os componentes da solução e assim afeta a velocidade de secagem e o nível de solvente residual.

Cairncross [Cairncross, 1995] estudou o efeito da ocorrência simultânea de reação química e secagem, mostrando resultados de grande valor prático.

Questões de segurança também podem ser uma restrição importante para a otimização do processo. Uma taxa de evaporação elevada pode aumentar a concentração de solvente na estufa além do limite mínimo de explosão e comprometer a segurança da operação.

Na seção 4.1 é apresentada uma metodologia para a otimização do processo de secagem e a seção 4.2 aborda a aplicação desta metodologia para um caso real na produção de fitas adesivas.

#### **4.1 Metodologia para otimização do processo de secagem**

O ajuste dos parâmetros de secagem das várias zonas de uma estufa é, historicamente, um processo empírico, onde por tentativa e erro chega-se a uma situação aceitável, embora possa não ser a situação ótima.

Este procedimento tem funcionado na prática, embora seja dispendioso para a companhia. Uma metodologia de otimização que consiga resultados tão bons ou melhores em termos de redução do tempo de residência, a um custo menor, é com certeza bem-vinda.

A proposta desta seção é apresentar uma metodologia que atinja este objetivo.

Esta metodologia fará uso do simulador de secagem e de observações e medições em produção, segundo os seguintes passos:

##### *a) Definição do problema*

Para iniciarmos a análise do processo devemos adquirir todos os dados de entrada necessários para o simulador. Entre estes dados (seção 3.2.2), alguns são facilmente encontrados na literatura e outros nem tanto.

Informações sobre propriedades de substâncias puras— volume específico, massa molar, calor de vaporização, parâmetros para determinação da pressão de vapor, etc— são facilmente encontradas na literatura.

Igualmente os parâmetros do processo também podem ser medidos em produção ou estimados pelo simulados, como veremos em seguida.

Os parâmetros para determinação dos coeficientes de difusão e os parâmetros de interação entre os componentes da solução são um pouco mais difíceis de encontrar. Algumas fontes para estas informações estão na bibliografia

sugerida. [Handbook of diffusion and thermal properties of polymers and polymer solutions]

Uma vez de posse de todas estas informações, prossegue-se para o próximo passo.

*b) Verificação da adequação do modelo*

*b1) Medição do perfil de temperatura do revestimento ao longo do comprimento da estufa*

O objetivo é traçar o perfil de temperatura do líquido durante o processo de secagem. Este dado é importante para a determinação do coeficiente de transferência de calor de cada zona da estufa.

As medições podem ser feitas através de sensores de temperatura (*dataloggers*) acoplados ao substrato ou por medidas individuais feitas manualmente com um sensor infravermelho. Devemos estar cientes de que a abertura da porta da estufa para efetuar a medição com certeza causa um desvio em relação à temperatura real.

*b2) Definição do coeficiente de transferência de calor*

O coeficiente de transferência de calor de uma estufa não é um parâmetro de fácil determinação e muitas vezes não está disponível para o engenheiro de processos.

Existem modelos desenvolvidos para obtenção do coeficiente de transferência de calor dados alguns parâmetros da geometria e posicionamento dos bicos de insuflação, além do número de *Reynolds e Prandtl* [Martin, 1977].

Uma outra forma de obtenção do coeficiente de transferência de calor é a utilização do simulador. Isto é feito pela comparação do perfil real de temperatura do líquido medido na etapa anterior, com o mesmo gráfico conseguido por simulação numérica.

O coeficiente de transferência de calor do modelo é ajustado até haver uma equivalência entre o a temperatura real e a temperatura prevista pela simulação.

*b3) Verificação do nível de solvente residual*

Com todos os parâmetros já determinados, deve-se rodar a simulação e comparar o valor do solvente residual previsto pelo modelo com o valor real de produção.

Nesta etapa pode-se chegar à conclusão de que os parâmetros do modelo não estão corretos e precisam de ajuste ou o resultado previsto está coerente com a situação real.

#### c) Otimização

Em seguida alteramos o tempo de residência para o valor objetivo e verificamos a diferença existente entre o valor de solvente residual encontrado e o objetivo estabelecido.

Pela análise do gráfico da temperatura de bolha x temperatura do revestimento visualizamos as oportunidades de aumento de temperatura ou ajuste do coeficiente de transferência de calor sem acarretar o aparecimento de bolhas. Com os novos parâmetros definidos, repetimos a simulação e verificamos se o novo nível de solvente residual está aceitável. Este procedimento deve ser seguido até que se encontrem os parâmetros ideais para o processo.

#### d) Validação em produção

Nesta etapa os parâmetros ideais previstos pelo modelo são testados em produção para confirmação ou reavaliação.

## 4.2 Estudo de caso

O estudo de caso que será apresentado visa a ilustrar a aplicação da metodologia sugerida na seção anterior e mostrar a utilidade da simulação do processo para gerar vantagem competitiva para a companhia.

O líquido revestido é um adesivo composto por um polímero acrílico em solução de acetato de etila (solvente 1) e tolueno (solvente 2), o substrato é papel.

Seguindo a metodologia, a primeira etapa é a *definição do problema* com o levantamento de todos os dados que serão necessários para a simulação do processo.

Propriedades dos componentes puros	
Volume específico do solvente 1 [cm <sup>3</sup> /g]	1,111
Volume específico do solvente 2 [cm <sup>3</sup> /g]	1,154
Volume específico do polímero [cm <sup>3</sup> /g]	1,111
Massa molar do solvente 1 [g/mol]	88,10
Massa molar do solvente 2 [g/mol]	92,11
Calor de vaporização do solvente 1 [J/g]	364,83
Calor de vaporização do solvente 2 [J/g]	361,10
Propriedades do substrato	
Espessura [cm]	0,00508
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	1,54
Calor específico [J/g.K]	1,90

<b>Propriedades do ar</b>	
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	0,001
Calor específico [J/g.K]	1,005

<b>Propriedades da solução</b>	
Densidade média [g/cm <sup>3</sup> ]	0,9
Calor específico médio [J/g.K]	1,83
Fator de interação entre polímero e solvente 1	-2,00
Fator de interação entre polímero e solvente 2	0,30
Fator de interação entre solvente 1 e solvente 2	0,20

<b>Parâmetros de difusão ( Vrentas )</b>	
K <sub>11</sub> /gama [cm <sup>3</sup> /g.K]	0,0021739
K <sub>12</sub> /gama [cm <sup>3</sup> /g.K]	0,0029633
K <sub>13</sub> /gama [cm <sup>3</sup> /g.K]	0,0013192
K <sub>21</sub> -Tg <sub>1</sub> [K]	-87,1468
K <sub>22</sub> -Tg <sub>2</sub> [K]	-179,01
K <sub>23</sub> -Tg <sub>3</sub> [K]	-224,5286
V <sub>1</sub> * [cm <sup>3</sup> /g]	0,305
V <sub>2</sub> * [cm <sup>3</sup> /g]	0,817
V <sub>3</sub> * [cm <sup>3</sup> /g]	0,983
epsilon <sub>13</sub>	0,843
epsilon <sub>23</sub>	0,580
E <sub>1</sub>	-24,76
E <sub>2</sub>	-25,31

<b>Condições iniciais</b>	
Espessura molhada [cm]	0,0275
Temperatura do revestimento [C]	25

<b>Parâmetros de processo</b>	
<i>Zona 1</i>	
Tempo de residência [s]	49
Coef. de transferência de calor lado do revestimento [W/cm <sup>2</sup> .K]	?
Coef. de transferência de calor lado do substrato [W/cm <sup>2</sup> .K]	?
Temperatura do ar lado do revestimento [C]	65
Temperatura do ar lado do substrato [C]	77
Pressão parcial do solvente 1 na estufa [Bar]	0
Pressão parcial do solvente 2 na estufa [Bar]	0
<i>Zona 2</i>	
Tempo de residência [s]	49
Coef. de transferência de calor lado do revestimento [W/cm <sup>2</sup> .K]	?
Coef. de transferência de calor lado do substrato [W/cm <sup>2</sup> .K]	?
Temperatura do ar lado do revestimento [C]	84
Temperatura do ar lado do substrato [C]	93
Pressão parcial do solvente 1 na estufa [Bar]	0
Pressão parcial do solvente 2 na estufa [Bar]	0
<i>Zona 3</i>	
Tempo de residência [s]	49
Coef. de transferência de calor lado do revestimento [W/cm <sup>2</sup> .K]	?
Coef. de transferência de calor lado do substrato [W/cm <sup>2</sup> .K]	?
Temperatura do ar lado do revestimento [C]	115
Temperatura do ar lado do substrato [C]	115
Pressão parcial do solvente 1 na estufa [Bar]	0
Pressão parcial do solvente 2 na estufa [Bar]	0

Em seguida devemos *verificar o modelo*, e o primeiro passo desta etapa é a *medição do perfil de temperatura do revestimento ao longo da estufa*. Esta medição foi feita manualmente com o auxílio de um sensor de infravermelho.

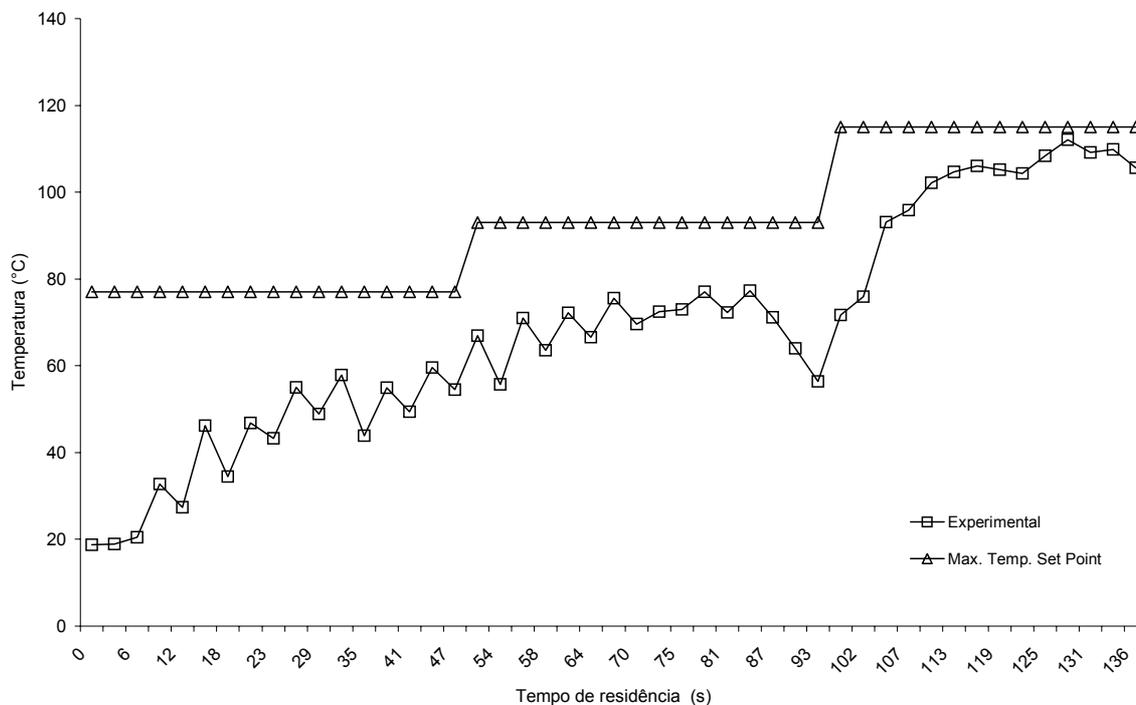


Figura 23 – Gráfico do perfil de temperatura da estufa

A melhor forma de se fazer a medição do perfil de temperatura do revestimento ao longo da estufa seria com o auxílio de um *datalogger* colocado sobre o substrato. Este procedimento evitaria o ruído gerado pela abertura das portas da estufa para a medição manual.

No caso da medição manual com o infravermelho, além de ser necessário reduzir o tempo em que a porta da estufa estará aberta, devemos ter o cuidado de ajustar a emissividade do equipamento para ser compatível com medições de temperatura em líquidos.

O perfil de temperatura é mostrado na figura 23 e apresenta caráter irregular devido a medições sob e entre bocais em uma estufa tipo *air flotation*.

Após determinado o perfil de temperatura real, devemos utilizar o simulador e os dados levantados na etapa um para ajustar os coeficientes de transferência de calor de cada zona da estufa de modo que o perfil de temperatura previsto se aproxime do perfil de temperatura real.

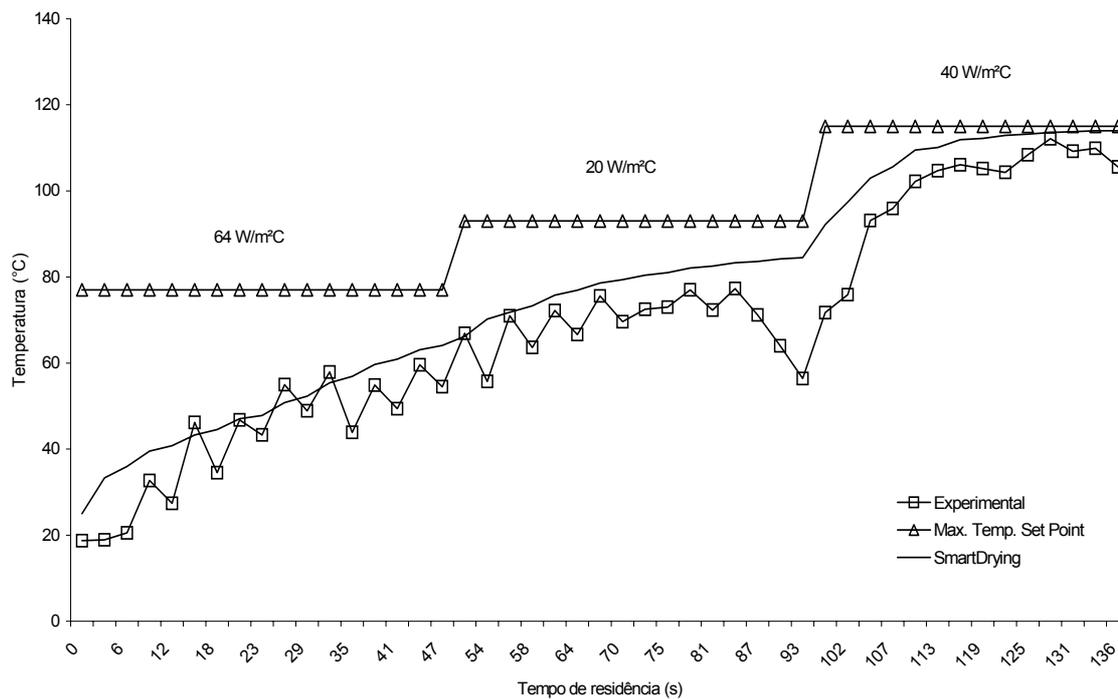


Figura 24 – Determinação do coeficiente de transferência de calor

A figura 24 mostra o valor dos coeficientes utilizados e a curva de temperatura prevista resultante.

Consideramos que o perfil de temperatura real é um pouco superior àquele que foi medido em decorrência do efeito da abertura das portas durante as medições de temperatura.

O próximo passo desta etapa é a comparação do nível de solvente residual real com o nível de solvente residual previsto pelo modelo.

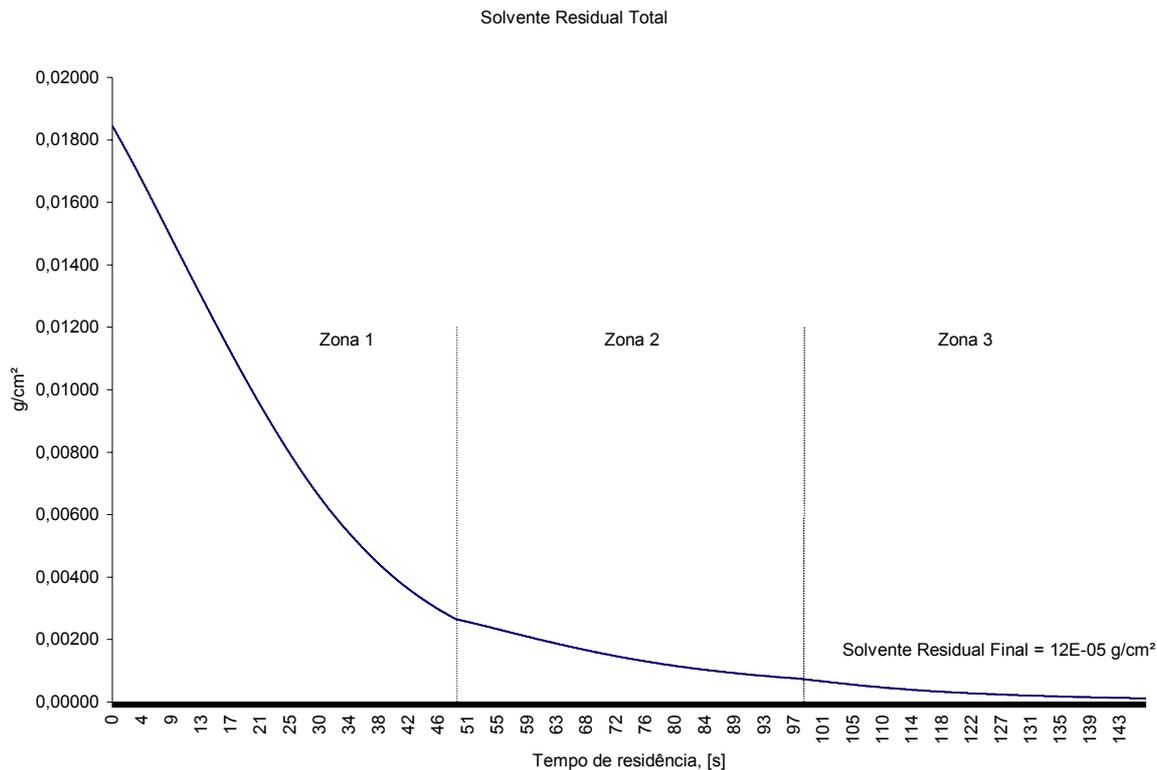


Figura 25 – Gráfico de solvente residual

O nível de solvente residual é uma característica crítica na produção de adesivos, existindo um valor máximo especificado de forma que o produto final tenha a qualidade necessária.

O solvente residual tende a agir como um plastificante no adesivo, tornando-o muito mole (ou “melado”) e assim pouco resistente a tensões.

O valor do solvente residual previsto pelo simulador foi  $12 \times 10^{-5}$  g/cm<sup>2</sup> enquanto o nível de solvente residual encontrado na prática para este adesivo é  $8 \times 10^{-5}$  g/cm<sup>2</sup>. Considerando todas as hipóteses e simplificações adotadas e os erros de medição a que estamos sujeitos, o valor previsto para o nível de solvente residual é aceitável e passa a ser o objetivo para as próximas simulações.

A próxima etapa da metodologia é a *otimização* dos parâmetros de secagem para reduzirmos o tempo de residência mantendo o nível de solvente residual dentro do objetivo.

O primeiro passo desta etapa é simular uma redução do tempo de residência para o valor objetivo e verificarmos como esta mudança afeta o nível de solvente residual previsto.

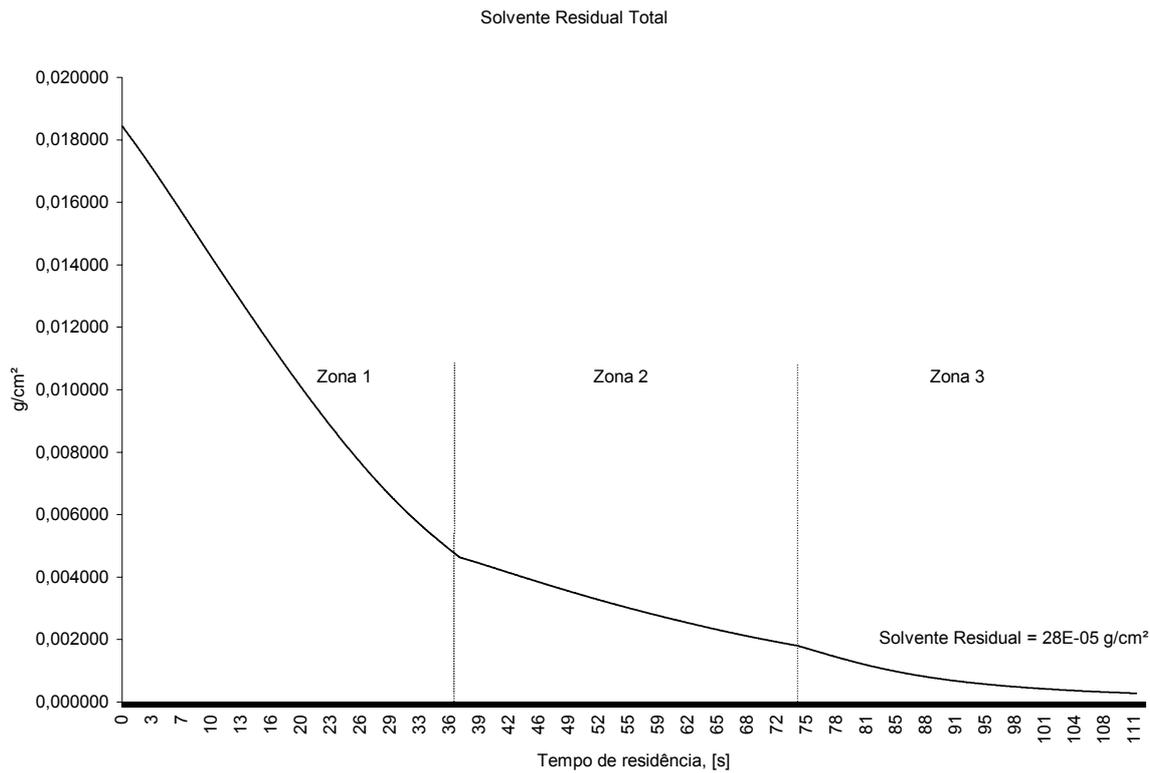


Figura 26 – Gráfico de solvente residual

O tempo de residência foi reduzido para 37 s em cada zona e como resultado tivemos o aumento do nível de solvente residual para  $28 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ . Agora temos que descobrir as mudanças nos parâmetros de processo que podem trazer o solvente residual previsto novamente para a faixa de  $12 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ . Para isto devemos avaliar o perfil de temperatura previsto e verificar a possibilidade de aumento de temperatura ou ajuste dos coeficientes de transferência de calor sem que a temperatura do revestimento se aproxime muito da temperatura de formação de bolhas.

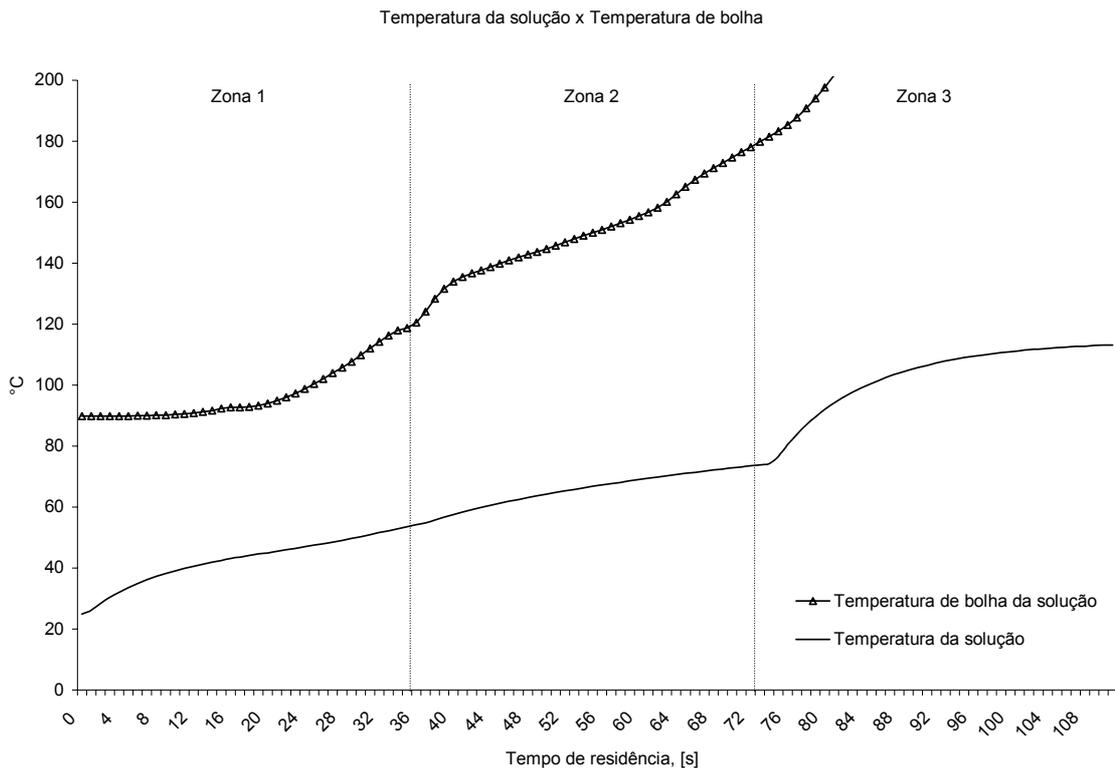


Figura 27 – Gráfico de temperatura de formação de bolhas

Pela figura 27 vemos que a temperatura da solução está bem abaixo da temperatura de formação de bolhas prevista pelo modelo, principalmente nas zonas dois e três.

Assim podemos simular um aumento de temperatura nas zonas dois e três e verificar qual é o impacto no valor do solvente residual.

Propomos a seguinte modificação nos parâmetros de processo:

<b>Parâmetros de processo</b>	
<i>Zona 1</i>	
Tempo de residência [s]	37
Coef. de transferência de calor lado do revestimento [W/cm <sup>2</sup> .K]	0,0032
Coef. de transferência de calor lado do substrato [W/cm <sup>2</sup> .K]	0,0032
Temperatura do ar lado do revestimento [C]	73
Temperatura do ar lado do substrato [C]	73
<i>Zona 2</i>	
Tempo de residência [s]	37
Coef. de transferência de calor lado do revestimento [W/cm <sup>2</sup> .K]	0,0010
Coef. de transferência de calor lado do substrato [W/cm <sup>2</sup> .K]	0,0010
Temperatura do ar lado do revestimento [C]	105
Temperatura do ar lado do substrato [C]	105
<i>Zona 3</i>	
Tempo de residência [s]	37
Coef. de transferência de calor lado do revestimento [W/cm <sup>2</sup> .K]	0,0020
Coef. de transferência de calor lado do substrato [W/cm <sup>2</sup> .K]	0,0020
Temperatura do ar lado do revestimento [C]	140
Temperatura do ar lado do substrato [C]	140

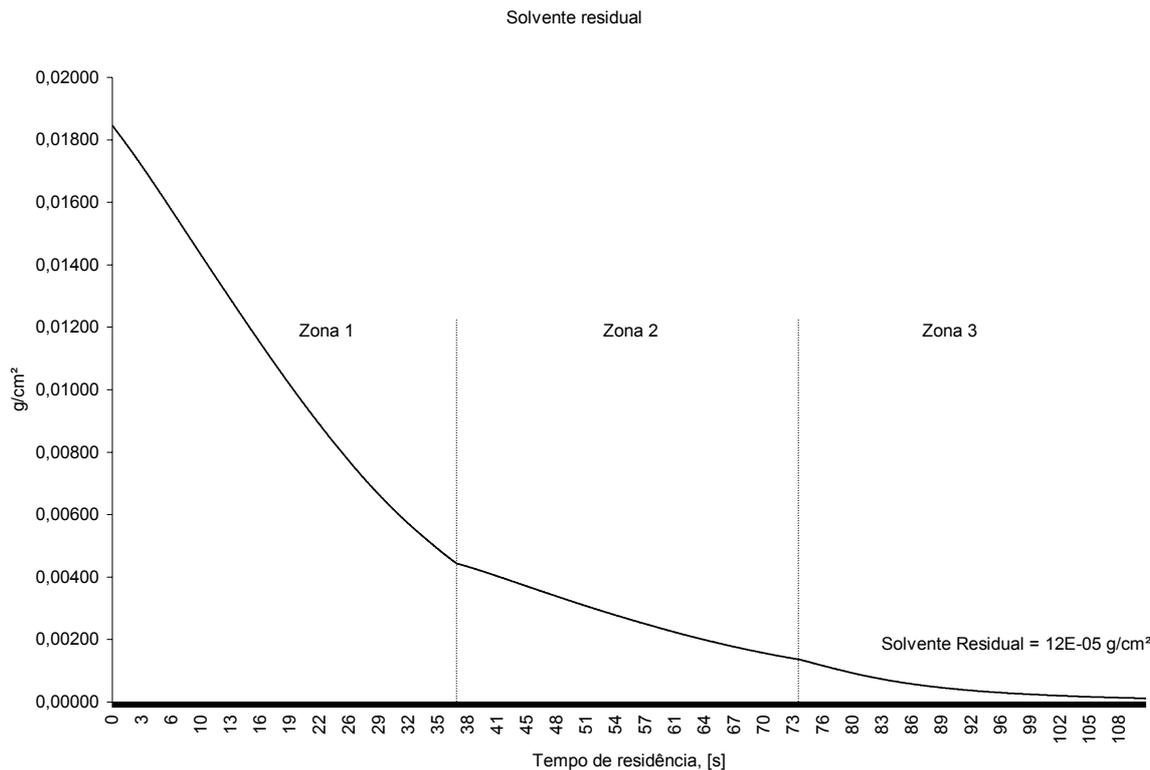


Figura 28 – Gráfico de solvente residual

Com os parâmetros de processo dados pela tabela acima, o valor do solvente residual voltou para o patamar inicial de  $12 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$  que era nosso objetivo. Portanto estamos prontos para irmos para a última etapa da metodologia de otimização, que é a validação dos resultados em produção.

A produção para validação dos resultados previstos foi realizada dia 07 de janeiro de 2004 na 3M do Brasil e se constituiu de um lote de 1000 m<sup>2</sup> da fita adesiva em questão.

Os resultados de solvente residual medidos em produção foram:

Número do teste	Solvente Residual (g/cm <sup>2</sup> )
1	$7 \times 10^{-5}$
2	$5 \times 10^{-5}$
3	$9 \times 10^{-5}$
4	$7 \times 10^{-5}$
5	$6 \times 10^{-5}$
6	$8 \times 10^{-5}$
7	$8 \times 10^{-5}$
8	$7 \times 10^{-5}$
<b>Média</b>	<b><math>7 \times 10^{-5}</math></b>

Com este resultado validamos a simulação feita e estamos aptos a obter um aumento de produtividade da ordem de 30%.

Este exemplo demonstrou o poder da simulação para obter ganhos reais de produtividade.

Embora a temperatura da solução se mantivesse bem abaixo da temperatura teórica de formação de bolhas conforme mostrado na figura 29, notou-se a presença de pequenas bolhas na fita adesiva, porém ainda dentro do limite aceitável para este produto.

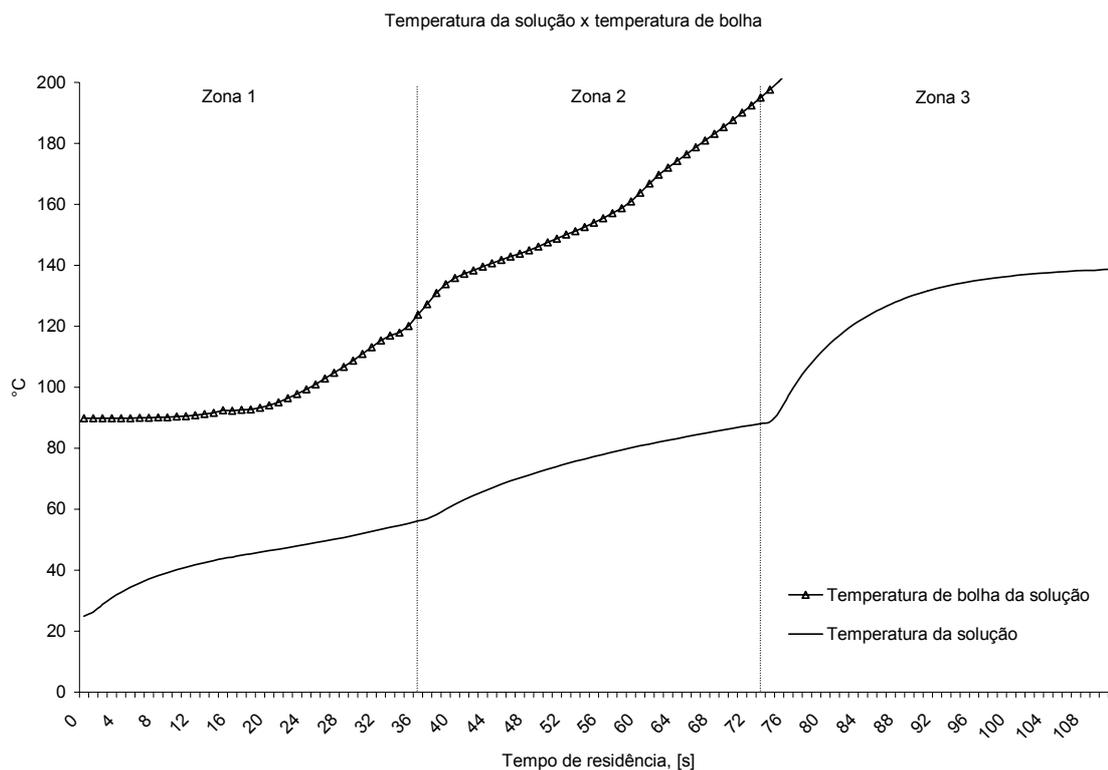


Figura 29 – Gráfico de temperatura de formação de bolhas

Conforme já mencionamos, a presença de ar difundindo na solução é o grande fator responsável pelo aparecimento de bolhas abaixo da temperatura prevista.

Daí a grande importância na melhoria das operações unitária anteriores ao revestimento (mistura, bombeamento, filtragem, etc) visando reduzir ao máximo o contato da solução com o ar.