

REINALDO BRITO GARCIA

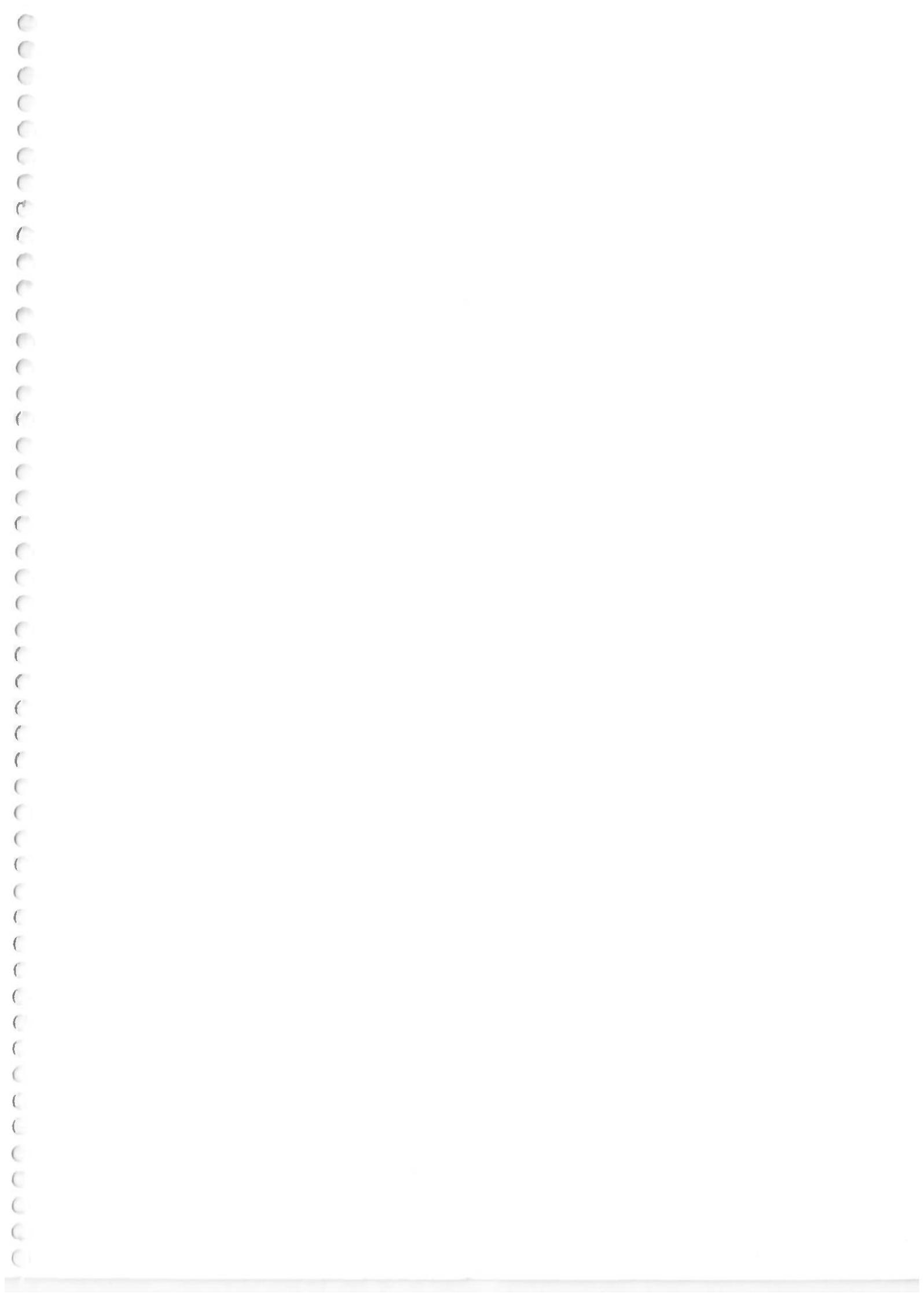
**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO
COEFICIENTE LOCAL DE TRANSFERÊNCIA DE
MASSA ATRAVÉS DA TÉCNICA DE ABSORÇÃO
DE AMÔNIA**

Dissertação apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de concentração :
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Jurandir Itizo Yanagihara

São Paulo
1998



A minha esposa M^a Isabel e a minha filha Raíssa que têm sido a grande razão e incentivo de meu aperfeiçoamento. A vida que sempre nos fornece uma oportunidade para deixarmos marcas da nossa existência.

AGRADECIMENTOS

As vezes é necessário lapidar o Homem, uma pedra bruta, e transformá-lo através de ensinamentos em pedra preciosa...

Ao amigo e orientador Prof. Dr Jurandir Itizo Yanagihara pelas diretrizes seguras e permanente incentivo.

Aos engenheiros, Walter S. Couto, Francisco F. Sales, Rogério Ribeiro, Antônio L. Pacífico, Andreas Westhenphalen, Celso Tavares, e ao Dr Evanildo Taglieri, João S. Garcia e a todos que colaboraram direta e indiretamente na execução desse trabalho.

SUMÁRIO

Listas de símbolos	
Resumo	
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Analogia Clássica de Transferência de calor e massa	3
2.1.1 Equacionamento	3
2.1.2 Analogia de Chilton-Colburn	14
2.2 Técnicas experimentais	18
2.3 Transferência de massa da superfície para o fluido	21
2.3.1 Método de Evaporação	21
2.3.2 Método de Sublimação	26
2.4 Transferência de massa do escoamento para a superfície	33
2.4.1 Método de absorção com reações químicas	34
2.4.2 Absorção com reações químicas e intensidade de cor	41
2.5 Métodos eletroquímicos	59
2.5.1 Processo físico do método	59
2.5.2 Uso do método eletroquímico na transferência de massa	63
3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE LOCAL DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA COM USO DA TÉCNICA DE ABSORÇÃO	66
3.1 Equacionamento	66
3.2 Processo físico e químico da técnica de absorção	68
3.3 Revestimento gelatinoso (GEL)	70
3.4 Aparato experimental	71
3.5 Formação da camada de dióxido de manganês	74
3.6 Procedimento para determinar a massa de amônia absorvida	76
3.6.1 Análise das equações químicas	76
3.7 Sistema de tratamento de imagem (STI)	79

4 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	80
4.1 Determinação da massa de amônia absorvida	81
4.2 Determinação da curva de calibração	86
4.2.1 Curva de calibração usando o espectro-fotômetro	87
4.2.2 Curva de calibração usando o STI	89
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
5.1 Conclusões	91
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	92

LISTAS DE SIMBOLOS

A	Área de transferência de calor	[mm ²]
b	Densidade de massa na superfície	[mg / cm ²]
c_i	Concentração da espécie i	[g / l]
c_p	Calor específico a pressão constante	[J / kg.°C]
d	Diâmetro	[mm]
D_{AB}	Coefficiente de difusão da espécie A na espécie B	[m ² / s]
d_h	Diâmetro hidráulico	[mm]
D_{na}	Coefficiente de difusão do naftaleno no ar	[m ² / s]
e	Quantidade de gás reagente transformado	[%]
f	Quantidade de ácido transformado	[kg]
G	Peso do filtro de papel	[kg]
h_c	Coefficiente local de transferência de calor	[W / m ² .°C]
\bar{h}_c	Coefficiente médio de transferência de calor	[W / m ² .°C]
h_m	Coefficiente local de transferência de massa	[m / s]
\bar{h}_m	Coefficiente médio de transferência de massa	[m / s]
j	Fator de Colburn	[]
k	Condutividade térmica	[w / m.K]
L	Comprimento característico	[m]
M	Massa molecular relativa	[Kg / mol]
$M_{\bar{A}}$	Massa molecular relativa equivalente	
m	Massa	[kg]
\dot{m}	Vazão mássica	[kg / s]
N	Normalidade	
p	Pressão	[Pa]
q''	Fluxo de calor	[W / m ²]
R	Constante universal dos gases	[J / Kmol. °C]
R	Refletividade da luz	[]
T	Temperatura	[K]
t_v	tempo de abertura da válvula (saída de amônia)	[s]
t	tempo	[s]

A	Área de transferência de calor	[mm ²]
u	Velocidade na direção principal do escoamento	[m / s]
U	Incerteza	-
v	Velocidade na direção transversal à superfície (z)	[m / s]
V	Vazão volumétrica	[m ³ / s]
x	Coordenada na direção principal do escoamento	[mm]
x_0	Comprimento de entrada não aquecido	[mm]
y	Coordenada transversal paralela à superfície	[mm]
z	Coordenada na direção perpendicular à superfície	[mm]

GREGOS

Δp	Diferença de pressão	[Pa]
Δm	Massa sublimada	[Kg]
Δt	Intervalo de tempo	[s]
ΔT	diferença de temperatura	[K]
ϕ	Umidade relativa -	
λ	Calor latente de sublimação	[J / Kg]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa / s]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² / s]
ρ	Densidade	[Kg / m ³]

ADIMENSIONAIS

C_f	Coefficiente de atrito
C_k	Coefficiente isentrópico
C_e	Coefficiente de expansão
f	Fator de atrito
j	Fator de Colburn

<i>Pr</i>	Número de Prandtl
<i>Re</i>	Número de Reynolds
<i>Sc</i>	Número de Schmidt
<i>Sh</i>	Número de Sherwood
<i>St</i>	Número de Stanton

SUBSCRITOS

A	Amônia
a	Ar
ac	Ácido
a.s	Ar seco
b.u	Bulbo úmido
c	Calor
i	Impregnado
m	Massa
mi	Mínima
n	Naftaleno
s	Superfície
sat	Saturado
se	Seco
v	Vapor
x	Eixo x
y	Eixo y
z	Eixo z
o	Condição inicial
∞	Condição ao longe

SOBRESCRITOS

*	Variável adimensional
---	-----------------------

RESUMO

A analogia entre a transferência de calor e de massa tem sido utilizada em experimentos de transferência de massa para medir, de forma indireta, a distribuição do coeficiente de transferência de calor. A analogia entre esses dois processos está bastante difundida e existem diversos métodos que a usam com boa exatidão para analisar escoamento em gases e em líquidos. Este trabalho contém um levantamento bibliográfico dos principais métodos de transferência de massa usados para analisar a distribuição do coeficiente de transferência de calor através da analogia entre esses dois processos. O objetivo desse trabalho é desenvolver uma metodologia de avaliação do coeficiente local de transferência de massa através da técnica de absorção da amônia. Para isso, foram realizados diversos testes para determinar qual o melhor composto a ser utilizado, resultando no uso de uma solução gelatinosa a base de sulfato de manganês. Uma outra novidade deste trabalho é a utilização de um sistema de tratamento de imagem para a obtenção dos coeficiente locais de transferência de massa.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Em situações de validade da analogia entre a transferência de calor e transferência de massa usam-se os métodos experimentais de transferência de massa para avaliar de forma indireta a distribuição local do coeficiente de transferência de calor. Ao usar a analogia entre esses dois processos, os métodos de transferência de massa possibilitam analisar a distribuição do coeficiente de transferência de calor local sobre superfícies irregulares. Nesses experimentos muitas vezes torna-se difícil medir em detalhes a distribuição do coeficiente local de transferência de calor principalmente ao ocorrerem mudanças rápidas de temperaturas sobre uma pequena região. Tais medições incluem erros devido a perdas por condução e radiação de calor na região, fatos que podem ser contornados com a utilização alternativa de métodos experimentais de transferência de massa.

Atualmente existe uma diversidade de métodos experimentais de transferência de massa. Esses métodos permitem analisar de forma fácil e a um baixo custo a distribuição do coeficiente de transferência de calor em escoamento de gases e líquidos sobre diversas superfícies, além de eliminar as perdas provenientes da transferência de calor por condução e radiação. Entretanto uma das condições de aplicabilidade do método de transferência de massa é que a superfície de análise deve ser isotérmica e adiabática, não podendo ser usado para outras condições de contorno térmicas (fluxo de calor constante, etc.)

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma metodologia que permita avaliar o coeficiente local de transferência de massa através da absorção da amônia. O princípio básico da técnica de absorção é usar reações químicas entre componentes reagentes para

obter sobre a superfície de ensaio um produto estável e colorido sendo que a intensidade da cor desse produto deve representar de forma direta a quantidade de massa transferida entre o fluxo e a superfície. Esse estudo fundamenta-se no fato de que apesar de existirem algumas técnicas que utilizam absorção de amônia, a maioria relaciona a massa absorvida com as propriedades de absorção e reflexão da luz. No entanto esse trabalho propõe relacionar a massa absorvida com a intensidade da cor formada usando para isto um Sistema de Tratamento de Imagem (STI). Esse fato torna-se possível porque uma cor pode ser definida pela quantidade de cores básicas que a compõem, no sistema RGB, (verde, azul e vermelho) ou pela ausência de cores (porcentagem de cinza). Ao utilizar um Sistema de Tratamento de Imagem constituído de um “*scanner*” e um “*software*”, a imagem do produto da reação formada na superfície, pode ser quantificada em termos de intensidade de cinza. A quantidade de massa absorvida é determinada por métodos experimentais e verificada através de análise química. Ao determinar a curva de calibração entre a densidade de massa absorvida e a porcentagem de cinza, desenvolve-se correlações que permitem determinar o coeficiente local de transferência de calor.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é descrever o equacionamento da analogia entre a transferência de calor e a transferência de massa e apresentar um resumo dos principais métodos usados para medir a transferência de massa. A revisão da literatura foi estruturada usando dados do DIALOG do período de 1988 à 1996, onde foi pouca a quantidade de artigos encontrados referentes a técnica de absorção. Através da análise das referências bibliográficas encontradas, consultou-se trabalhos atuais e anteriores que serviram de base para o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação do coeficiente local de transferência de massa através da técnica de absorção de amônia apresentada nesta dissertação.

2.1 ANALOGIA CLÁSSICA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA.

2.1.1 EQUACIONAMENTO

A analogia entre os processos de transferência de calor e de massa permite determinar o coeficiente local de transferência de calor usando experimentos de transferência de massa. A analogia entre esses dois processos foi descrita em detalhes para um fluido com propriedades constantes por Eckert [1] e Incropera [2]. Para o desenvolvimento da analogia parte-se das equações diferenciais que modelam o processo físico do problema a ser estudado seguindo uma série de simplificações. Isso justifica-se dado que o objetivo deste trabalho está no desenvolvimento de uma metodologia de

avaliação do coeficiente local de transferência de massa através da técnica de absorção de amônia e que são raras as situações onde todos os termos das equações precisam ser considerados. As situações usuais são aquelas nas quais o escoamento na camada limite pode ser caracterizado como incompressível, tendo propriedades constantes e com forças de campo desprezíveis. Além dessas hipóteses tem-se :

- ▶ A velocidade na direção do escoamento é muito maior em relação a velocidade transversal.
- ▶ As forças de empuxo são desprezíveis quando comparadas com as forças inerciais e de pressão.
- ▶ Os gradientes de concentração, temperatura e velocidade, normal à superfície de transferência, são maiores do que aqueles da direção do escoamento.
- ▶ O fluxo de calor gerado pela dissipação viscosa do fluido é desprezível.
- ▶ O fluxo está livre de fontes internas de calor e reações químicas.
- ▶ O escoamento é bidimensional.
- ▶ A taxa de transferência de massa da substância A para o fluido B deve ser pequena ou seja a velocidade na camada limite é caracterizada pela existência de velocidade zero do fluido na superfície. Essa condição permanece para o componente da velocidade normal à superfície, assim para a componente da velocidade na direção do escoamento. Isto se justifica pois, embora ocorra transferência de massa nas interfaces, gás- líquido ou gás-sólido, da superfície nas principais técnicas de transferência de massa que envolve transferência de massa por sublimação, evaporação ou absorção, o processo de transferência de massa tem um efeito desprezível na velocidade da camada limite.

Tendo-se por base essas condições, as equações simplificadas que representam

o escoamento são :

Equação da continuidade

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Equação da quantidade de movimento na direção x

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.2)$$

Equação da energia

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.3)$$

No processo de transferência de massa, pode ocorrer transferência de massa do escoamento para a superfície, ou da superfície para o escoamento. Em ambos os casos têm-se uma mistura de dois componentes A e B e uma só fase. Neste caso pode-se usar como propriedades da camada limite as propriedades da mistura dos fluidos. Entretanto quando a concentração do componente A é muito maior do que o componente B , situação que ocorre nas principais técnicas de transferência de massa, é possível admitir que as propriedades da camada limite sejam da espécie A . Com essas simplificações e aproximações a equação de transferência de massa é expressa na seguinte forma :

$$u \frac{\partial C_A}{\partial x} + v \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \quad (2.4)$$

As equações 2.2, 2.3 e 2.4 estão sujeitas as condições de contorno apresentadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1, Condições de contorno das equações simplificadas que representam o escoamento

Velocidade	Temperatura	Concentração
$u_{(x,0)} = 0$	$T_{(x,0)} = T_w$	$C_{A(x,0)} = C_{A,S}$
$u_{(x,\infty)} = U_\infty$	$T_{(\theta,z)} = T_\infty$	$C_{A(x,\infty)} = C_{A,\infty}$
$u_{(\theta,z)} = U_\infty$	$T_{(x,\infty)} = T_\infty$	$C_{A(\theta,z)} = C_{A,\infty}$
$v_{(x,0)} = 0$		

As variações espaciais nas diferentes camadas limite, de u , v , T , e C_A são obtidas ao resolver as equações de 2.1 a 2.4. O desenvolvimento das equações da camada limite não serve apenas para obter soluções para um determinado escoamento. Essas equações, ao serem normalizadas, servem para identificar os parâmetros de similaridade das camadas limites. Os parâmetros de similaridades são importantes porque permitem generalizar os resultados obtidos, ao analisar a superfície de interesse, à geometria semelhantes em condições totalmente diferentes. Essas condições podem variar, por exemplo, com a natureza e velocidade do fluido, e / ou com o tamanho da superfície.

Obtém-se a normalização ao introduzir um conjunto de variáveis adimensionais nas equações que descrevem o escoamento. As variáveis adimensionais são definidas como:

- variáveis independentes :

$$x^* \equiv \frac{x}{L} \quad e \quad z^* \equiv \frac{z}{L} \quad (2.5)$$

onde L é um comprimento característico para a superfície de interesse.

- variáveis dependentes onde u_∞ é a velocidade do escoamento

$$u^* \equiv \frac{u}{u_\infty} \quad e \quad v^* \equiv \frac{v}{\nu_\infty} \quad (2.6)$$

A temperatura e a concentração da camada limite são representadas por:

$$T^* \equiv \frac{T - T_s}{T_\infty - T_s} \quad (2.7)$$

$$C_A^* \equiv \frac{C_A - C_{A,S}}{C_{A,\infty} - C_{A,S}} \quad (2.8)$$

Ao substituir as equações 2.5 a 2.8 nas equações 2.1 a 2.4 Obtém-se a forma adimensionalizada das equações que descrevem o processo de transferência convectivo indicadas na tabela 2.2.

No termo $\nu / VL = 1 / Re$, que aparece na equação 2.9 tem-se um grupo adimensional denominado Número de Reynolds, ou seja

$$Re_L \equiv \frac{VL}{\nu} \quad (2.12)$$

Da equação 2.10 o termo α / VL , é um grupo adimensional que pode ser expresso como $(\alpha / VL)(\alpha / \nu) = (Re_L)^{-1}(\alpha / \nu) = 1 / Pr$, é um grupo

Tabela 2.2, Equações de transferência convectiva e condições de contorno na forma adimensionalizada

Camadas limite	Equação de conservação	condições da camada limite	
		PAREDE	FLUXO LIVRE
Velocidade	$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*} = -\frac{dp^*}{dx^*} + \frac{\nu}{VL} \frac{\partial^2 u^*}{\partial z^{*2}}$ <p style="text-align: center;">(2.9)</p>	$u^*(x^*, 0) = 0$ $v^*(x^*, 0) = 0$	$u^*(x^*, \infty) = 1$
Térmica	$u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial z^*} = \frac{\alpha}{VL} \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^{*2}}$ <p style="text-align: center;">(2.10)</p>	$T^*(x^*, 0) = 0$	$T^*(x^*, \infty) = 1$
Concentração	$u^* \frac{\partial C_A^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial C_A^*}{\partial z^*} = \frac{D_{AB}}{VL} \frac{\partial^2 C_A^*}{\partial z^{*2}}$ <p style="text-align: center;">(2.11)</p>	$C_A^*(x^*, 0) = 0$	$C_A^*(x^*, \infty) = 1$

adimensional denominado Número de Prandtl, ou seja

$$Pr \equiv \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.13)$$

Da equação de transferência de massa 2.11, o termo D_{AB}/VL é equivalente a

$$\frac{D_{AB}}{\nu} \left(\frac{\nu}{VL} \right) = (Re_1)^{-1} \frac{D_{AB}}{\nu}$$

A razão $D_{AB}/\nu = 1/Sc$ é um grupo adimensional denominado número de Schmidt, ou seja

$$Sc \equiv \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (2.14)$$

Além desses números adimensionais tem-se na tabela 2.3 um resumo dos principais grupos adimensionais usados no estudo da transferência de calor e massa por convecção. Substituindo as equações 2.12, 2.13 e 2.14 nas equações 2.9, 2.10 e 2.11 obtêm-se a forma adimensionalizada das equações da camada limite em função dos parâmetros de similaridades apresentadas na tabela 2.4 :

Na tabela 2.5 tem-se um resumo da dependência entre as camadas limites e propriedades do fluido assim como, as relações funcionais das equações de modelagem do fluido em termos de grupos adimensionais.

Tabela 2.3. Seleção dos principais grupos adimensionais no processo de transferência de calor e de massa.

Grupo	Definição	Interpretação
Número de Lewis (<i>Le</i>)	$\frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{Sc}{Pr}$	Razão entre a difusividade térmica e de massa
Número de Nusselt (<i>Nu</i>)	$\frac{h_c L}{k_f} = \frac{\alpha'}{\alpha'_{i=0}}$	Adimensional para o coeficiente de transferência de calor
Número de Prandtl (<i>Pr</i>)	$\frac{c_p \cdot \mu}{K} = \frac{\nu}{\alpha}$	Razão entre a difusividade viscosa e térmicas
Número de Reynolds (<i>Re</i>)	$\frac{\nu \cdot L}{\nu}$	Razão entre as forças de inércia e forças viscosas
Número de Schmidt (<i>Sc</i>)	$\frac{\nu}{D_{AB}}$	Razão entre as difusividades viscosas e mássicas
Número de Sherwood (<i>Sh</i>)	$\frac{h_m \cdot L}{D_{AB}}$	Adimensional para o coeficiente de transferência de massa

Tabela 2.4, Equações de transferência convectiva na forma adimensionalizada

Camadas limites	Equação adimensionalizada	Parâmetros de similaridades presentes nas equações
Velocidade	$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{1}{Re_L} \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}}$	Re_L
Térmica	$u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial z^*} = \frac{1}{Re_L Pr} \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}}$	Re_L, Pr
Concentração	$u^* \frac{\partial c_A^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial c_A^*}{\partial z^*} = \frac{1}{Re_L Sc} \frac{\partial^2 c_A^*}{\partial x^{*2}}$	Re_L, Sc

Tabela 2.5, Dependência entre as camadas limites e propriedades do fluido.

Interpretação	Velocidade u^*	Concentração h_m	Temperatura h_c
Velocidade do fluido	v	v	v
Propriedades do fluido	ρ, μ	D_{AB}, ρ, μ	K, c_p, ρ, μ
Comprimento característico	L	L	L
Relação funcional	$u^* = u^*(x^*, z^*, Re_L, \frac{dp^*}{dx^*})$	$c_A^* = c_A^*(x^*, z^*, Re_L, Sc)$	$T_A^* = T_A^*(x^*, z^*, Re_L, Pr)$

No processo de transferência de calor por convecção, o coeficiente de transferência é expresso como a relação entre o fluxo de calor por unidade de área e o potencial de temperatura, ou seja :

$$h_c = \frac{\dot{q}}{T_s - T_\infty} \quad (2.15)$$

O número de Nusselt, definido na tabela 2.3, é representado por

$$Nu = \frac{\partial T}{\partial x^*} \Big|_{y^*=0} = \frac{h.L}{K} \quad (2.16)$$

A relação funcional obtida para a transferência de calor, tabela 2.5, é

$$T_A^* = T_A^*(x^*, z^*, Re_L, Pr) \quad (2.17)$$

onde tira-se a dependência de z^* da relação $z^*=0$ obtendo-se

$$Nu = Nu(x^*, Re, Pr) \quad (2.18)$$

Essa expressão implica que, para uma dada geometria, o número de Nusselt é uma função de x^* , Re_L , Pr e pode-se utilizá-la para calcular os valores de Nu de diferentes fluidos e diferentes valores de ν e L .

Ao determinar o valor do número de Nusselt, o coeficiente de transferência de calor pode ser encontrado e o fluxo de calor transferido pela superfície pode ser calculado pela equação 2.16.

Resultados semelhantes são obtidos para a transferência de massa onde a expressão adimensional para o gradiente de concentração sobre a superfície é o número de Sherwood. A tabela 2.6 fornece um resumo das principais equações para aplicar a analogia entre a transferência de calor e de massa. A diferença entre os números de Nusselt e Sherwood nas relações funcionais, tabela 2.6, está associada aos números de Prandtl e Schmidt.

Tabela 2.6, Equações básicas do processo de transferência de calor e de massa.

Grandezas	Transferência de calor	Transferência de massa
Fluxo local	$\dot{q} = h_c(T_s - T_\infty)$	$\dot{N}_A = h_m(C_{As} - C_{A\infty})$
Fluxo na superfície para $z=0$	Lei de Fourier $\dot{q} = -K \frac{\partial T}{\partial z} \Big _{z=0}$	Lei de Fick $\dot{N}_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} \Big _{z=0}$
Coeficientes	$h_c = \frac{K}{L} \frac{\partial T}{\partial z^*} \Big _{z^*=0}$	$h_m = \frac{D_{AB}}{L} \frac{\partial C_A^*}{\partial z^*} \Big _{z^*=0}$
Grupos adimensionais	Nusselt $Nu = \frac{\partial T}{\partial z^*} \Big _{z^*=0} = \frac{h_c \cdot L}{K}$	Sherwood $Sh = \frac{h_m \cdot L}{D_{AB}} = \frac{\partial C_A^*}{\partial z^*} \Big _{z^*=0}$
Relação funcional em $z^*=0$	$Nu = Nu(x^*, Re_L, Pr)$	$Sh = Sh(x^*, Re_L, Sc)$

De modo genérico os números de Nusselt e Sherwood estão correlacionados por equações da forma

$$\begin{aligned} Nu &= c \cdot Re^m \cdot Pr^n \\ Sh &= c \cdot Re^m \cdot Sc^n \end{aligned} \quad (2.19)$$

Dividindo-se as equações membro a membro a dependência de c e Re fica com valor unitário resultando :

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n \quad \text{ou} \quad \frac{Nu}{Pr^n} = \frac{Sh}{Sc^n} \quad (2.20)$$

Substituindo as variáveis na equação 2.20 acima tem-se :

$$\frac{h_c}{h_m} = \frac{K}{D_{AB} \cdot Le^n} = \rho c_p \cdot Le^{1-n} \quad (2.21)$$

A relação 2.21 expressa a forma clássica da analogia entre a transferência de calor e a transferência de massa abrangendo desde escoamento laminares até turbulentos. O uso dessa expressão possibilita determinar um dos coeficientes de transferência por convecção (h_m ou h_c). Contudo os trabalhos analisados na revisão bibliográfica usam a conversão dos coeficientes de transportes na faixa de $0,6 < Pr < 10^4$ e $0,6 < Sc < 10^4$.

2.1.2 ANALOGIA DE CHILTON-COLBURN

Um outro modo de escrever a analogia entre a transferência de calor e a transferência de massa é através da forma simplificada da analogia de Chilton-Colburn usando o fator j .

No processo de transferência de calor e de massa j e j_m são expressos por :

$$j = St \cdot Pr^{1-n} = \frac{Nu}{Re \cdot Pr^n} = c \cdot Re^{m-1} \quad (2.22)$$

$$j_m = St_m \cdot Sc^{1-n} = \frac{Sh}{Re \cdot Sc^n} = c \cdot Re^{m-1} \quad (2.23)$$

Ao igualar as expressões ($j = j_m$) obtém-se :

$$\frac{Nu}{Pr^n \cdot Re} = \frac{Sh}{Sc^n \cdot Re} \Rightarrow \frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n = Le^{-n} \quad (2.24)$$

$$\frac{h}{h_m \cdot \rho \cdot c_p} = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{1-n} \Rightarrow \left(\frac{a}{D_A} \right)^{1-n} = Le^{1-n} \quad (2.25)$$

Uma restrição à analogia está em determinar o expoente, (n), dos números de Prandtl e Schmidt que aparecem ao escrever a forma clássica da analogia representada pela equação 2.25. Além do mais essa expressão é inadequada para ser empregada na prática, pois os expoentes dos números de Pr e Sc não são constantes. Contudo quando o número de Prandtl for igual ao número de Schmidt tem-se o número de Lewis igual a um, fato que elimina a dependência da analogia com o expoente. Para situações onde esse fato não ocorre, pode-se usar como referência da figura 2.1 tirado de Kottke [3] onde se tem curvas de distribuição do expoente n em função dos números de Prandtl e Schmidt,

possibilitando obter o valor de n de forma aproximada.

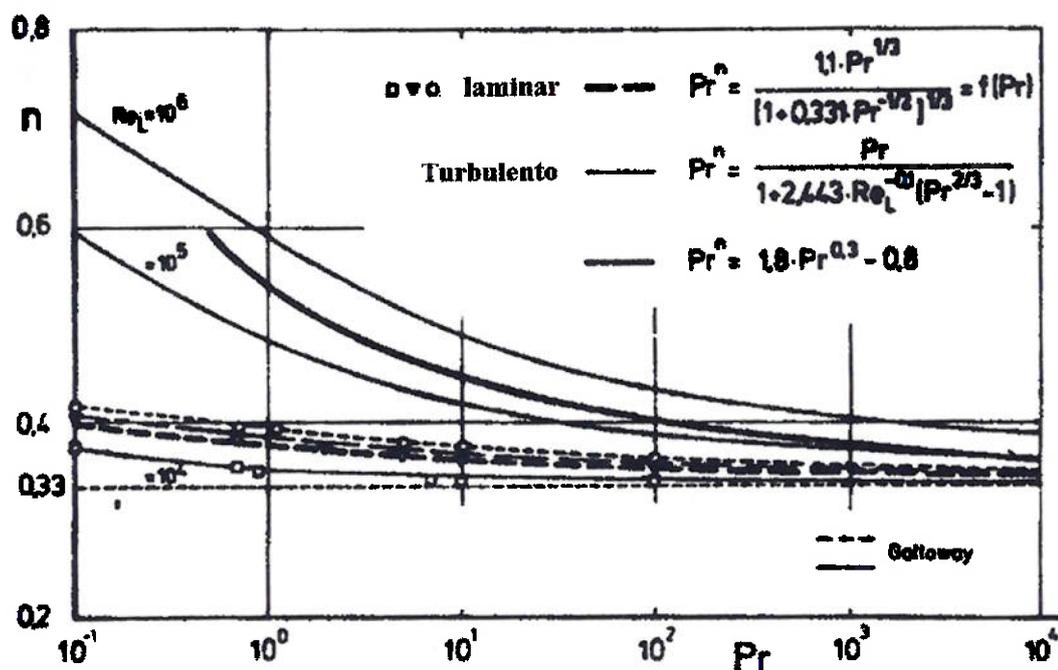


Figura 2.1 Distribuição do expoente “ n ” em função dos números de Pr e Sc

Na figura 2.1 as linhas tracejadas fornecem valores aproximados do expoente dos números de Prandtl para camada limite laminar e as curvas não tracejadas fornecem valores dos expoentes para a camada limite turbulenta. Na camadas limite laminar, o expoente n está na faixa de $0,33 < n < 0,45$. Galloway apud Kottke [3] analisou escoamento longitudinais sobre placas planas, e fez um estudo sobre o ponto de estagnação em 2 D e 3 D com intensidade de turbulência igual a zero ($Tu = 0$) recomendando que a expressão abaixo poderá ser usada para camada limite laminar.

$$f(Pr) = Pr^n = \frac{1,1 \cdot Pr^{1/3}}{\left[1 + 0,331 \cdot Pr^{1/2}\right]^{1/3}} \quad (2.26)$$

Gnielinski apud Kottke [3] forneceu a expressão empírica abaixo para ser usada para camada limite turbulenta em escoamento sobre uma placa plana. Essa expressão apresenta também bons resultados quando utilizada em escoamento laminares.

$$f(Pr) = Pr^n = \frac{Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (2.27)$$

Hausen apud Kottke [3], ao analisar a camada limite turbulenta em escoamento através de tubos, propôs a expressão abaixo.

$$f(Pr) = Pr^n = 1,8 \cdot Pr^{0,3} - 0,8 \quad (2.28)$$

Ao usar essas equações supracitadas pode-se reescrever a relação da analogia de forma adequada através da função $f(Pr)$ e $f(Sc)$ em vez de usar os termos $(Pr)^n$ e $(Sc)^n$. Tendo por base essas considerações a forma final das equações que descrevem a analogia é escrita por :

$$\frac{Nu}{Re \cdot f(Pr)} = \frac{Sh}{Re \cdot f(Sc)} \quad (2.29)$$

onde $f(Pr)$ e $f(Sc)$ é determinado de forma direta ao usar os dados da figura 2.2.

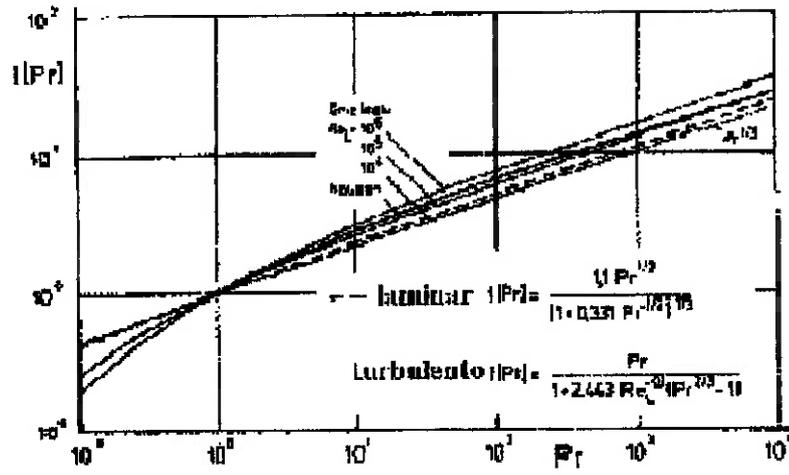


Figura 2. 2 Distribuição de $f(Pr)$ em função dos números de Prandtl

2.2 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Os métodos para medir o coeficiente de transferência de massa podem ser divididos em duas categorias denominadas medições diretas e medições indiretas. Para a determinação **indireta** da transferência de massa usa-se o princípio de técnicas de semelhanças da camada limite de concentração com a camada limite térmica; nesse procedimento a concentração ou a densidade são calculadas teoricamente. Existem diferentes técnicas de medição que são usadas em grande escala para determinar **diretamente** o coeficiente de transferência de massa local em um escoamento com propriedades constantes. Um resumo dos trabalhos mais antigos é encontrado nas referências de Eckert [1] e Krückels [4]. Em 1978 Kottke [3] apresentou as técnicas de transferência de massa de acordo com o processo físico-químico da transferência de massa que ocorre na superfície.

O processo de transferência de massa pode ser classificado em : transferência de massa da superfície para o fluido, transferência de massa do fluido para a superfície e métodos eletroquímicos . Essa classificação fornece informações a respeito da distribuição quantitativa, sensibilidade do método, e direção e orientação do transporte de massa. Essa divisão está representada nas tabelas 2.8, 2.9 e 2.10, onde se estabelece para cada método de medição, as faixas de valores dos números de Schmidt .

Tabela 2.8, Métodos para medir o transporte de massa com transferência de massa para o escoamento.

Métodos para medir a transporte de massa	Grandeza medida	Técnica de medição	Sc
Evaporação	Perda de massa na superfície	Pesagem Técnicas óticas	0,6 a 3
	Deformação da superfície.	Medições do perfil	
Sublimação	Deformação da superfície $h_m = \frac{\rho_s \cdot h}{t \cdot \rho_{AW}}$	Medições do perfil	0,6 a 3

Tabela 2.9, Métodos eletroquímicos para medir a transferência de massa

Métodos para medir a transferência de massa	Grandeza medida	Técnica de medição	Sc
Eletroquímico	Transferência de carga	Medição da corrente	700 a 100000
	Quimiluminescência	Fotométricas	

Tabela 2.10, Métodos para medir o transporte de massa com transferência de massa para a superfície .

Métodos para medir o transporte de massa	Grandeza medida	Técnica de medição	Sc
Adsorção	Densidade de massa na superfície. Distribuição da intensidade colorida $h_m = \frac{b}{\rho_{A\infty} \cdot t}$	Fotométrico	700 a 40000
Absorção com reações químicas	Concentração do ácido	Análise química Titulação	0,6 a 3
	Densidade de massa na superfície $h_m = \frac{b}{\rho_{A\infty} \cdot t}$	Fotométricas	
Absorção com reações químicas e intensidade de coloração	Densidade de massa na superfície distribuição da intensidade de cor $h_m = \frac{b}{\rho_{A\infty} \cdot t} = \frac{b \cdot V_L}{m_A}$	Fotométrico. Tratamento de imagem.	0,6 a 3

2.3 TRANSFERÊNCIA DE MASSA DA SUPERFÍCIE PARA O FLUIDO

Os métodos de avaliação do coeficiente de transferência de massa estão classificados, neste trabalho, de acordo com a mudança de fase da substância contida na superfície. Se ocorrer a transformação de líquido para gás será método de evaporação e de sólido para gás será método de sublimação. Nesses métodos as grandezas medidas são: a quantidade de massa perdida pela superfície e a deformação e/ou erosão ocorrida devido a essa perda. Atualmente existem várias técnicas de medição que permitem determinar, com eficiência, a quantidade de massa transferida para o escoamento, aumentando a acurácia dos métodos de transferência de massa.

2.3.1 MÉTODO DE EVAPORAÇÃO

O método de evaporação consiste em depositar uma quantidade de líquido em uma superfície e avaliar a porcentagem de líquido evaporado para o meio ambiente em um determinado intervalo de tempo. A quantidade de líquido evaporado serve de parâmetro para fornecer o coeficiente de transferência de massa. Contudo ao utilizar o método de evaporação, para determinar o coeficiente de transferência de calor, deve-se realizar os experimentos em situações onde ocorra a analogia entre os processos de transferência de calor e de massa. O método de evaporação também pode ser usado para visualização do escoamento.

Análise quantitativa

A análise quantitativa visa determinar a quantidade de massa perdida pela superfície, ou determinar a deformação causada devido a essa perda. Dentre outras usam-

se as técnicas de pesagem e técnicas óticas para medir a massa perdida pela superfície e medidores de perfil para avaliar as alterações da espessura da superfície, provenientes da perda de massa. Contudo, a utilização desses aparelhos está relacionado ao tipo de superfície a ser analisada, bem como a exatidão a ser alcançada no cálculo da massa evaporada. Em ambos os casos a quantidade de massa perdida é convertida em coeficiente de transferência de massa. Um resumo das principais técnicas usadas para avaliar a massa transferida da superfície no método de evaporação está representado na tabela 2.11.

Tabela 2.11, Resumo das principais técnicas usadas no método de evaporação.

Técnica de medição	Grandeza medida	Escoamento	Referência
Medindo a vazão do aparato. -Cálculo da energia elétrica	Perda global de massa na superfície	Convecção natural em uma placa vertical	2
		Convecção forçada sobre uma placa plana	1
Medição do perfil	Deformação da superfície	Placa plana	1
Micro densitômetro	Densidade ótica de chapas fotográficas impressas	Geometria simples	6
Medições óticas	Coefficientes de reflexão e absorção da luz	Placa plana, cilindro	7

Um dos primeiros a combinar o uso da analogia calor-massa, em convecção natural através do método de evaporação, foi Hilpert em 1932 apud Eckert [1] .

Em 1935, Powel e Griffiths apud Eckert [1] desenvolveram um aparato experimental para estudar a convecção forçada sobre uma placa isotérmica. Nesse estudo

a taxa de líquido evaporado foi determinada:

- ▶ diretamente, pelo cálculo da quantidade de água necessária para reabastecer o tubo.
- ▶ indiretamente, através do cálculo da energia elétrica gasta para manter a superfície a uma temperatura uniforme. Com esses procedimentos obtiveram-se valores globais do coeficiente de transferência de massa.

Em 1973 McLeod et al apud Kottke [3], mediram as alterações de espessuras de finas camadas de látex devido a evaporação . Nesse estudo determinaram-se alterações longitudinais na ordem de 10^{-6} m. Entretanto a utilização desse método permanece restrito à placa plana. Para medir a transferência de massa em pequenas áreas Varol [6] desenvolveu uma técnica ótica usando micro densitômetro. Varol usou um conjunto de ácidos coloridos e um sistema de filmes de polímero de acetato (Nylon 66 produzido pela Imperial Chemical Industries) para cobrir de modo uniforme a superfície. A curva de calibração foi obtida ao relacionar a leitura do micro densitômetro com a cor formada após o processo de evaporação.

Dentre os métodos de evaporação, destaca-se a metodologia desenvolvida por Utton e Sheppard [7] que por intermédio de uma técnica ótica obtiveram com maior exatidão e de forma mais simples o coeficiente local de transferência de massa. A técnica baseia-se no fato de que os coeficientes de reflexão e absorção da luz em certos papéis absorventes são proporcionais ao teor de líquido contido neles. Logo, ao medir o coeficiente de reflexão ou absorção dos papéis fixados na superfície de interesse durante o processo de secagem convectivo, é possível determinar a taxa de transferência de massa do líquido evaporado pela superfície. Nesse processo é necessário realizar uma série de testes para investigar a relação entre a quantidade de líquido contido no papel absorvente

com as propriedades de reflexão e transmissão da luz. Utton [7] concluiu que a variação da intensidade da luz é proporcional a massa de líquido evaporado do papel.

A intensidade de luz refletida é indicada pela voltagem da fotocélula e a quantidade de água evaporada é determinada pela diferença de peso do papel em cada intervalo. Utton [7] recomenda que ao realizar os experimentos, deve-se garantir que a concentração do vapor evaporado para o escoamento seja desprezível e, ao utilizar o papel para cobrir a superfície, deve-se avaliar a migração do líquido no papel absorvente e realizar os testes onde esse efeito seja desprezível.

Avaliação qualitativa

Kottke [5] forneceu informações a respeito dos principais processos de evaporação que são utilizados para visualizar o escoamento. Dentre eles destaca-se a Técnica de China-Clay. Nessa técnica, reveste-se a superfície de ensaio com uma camada sólida de caulim. Sobre essa camada faz-se uma cobertura transparente ao depositar um líquido com índice refrativo semelhante ao do caulim e com alta pressão de vapor. Sobre a superfície, durante o escoamento, as posições de alta transferência de massa secam primeiro, voltando à cor branca inicial. Ao ocorrer essa transformação pode-se filmar o processo de secagem. A camada limite de concentração é alterada pela secagem parcial da superfície, além do preparo da superfície ser tediosa. Entretanto, a camada formada pode ser utilizada para novos ensaios. Além da técnica de China-Clay, Kottke [5] fornece informações sobre a técnica desenvolvida por Opitz e Kimmel que utilizaram um revestimento gelatinoso para cobrir a superfície e analisaram o perfil de secagem por meio de técnicas fotográficas.

Conclusões sobre as técnicas de evaporação.

Para os métodos de evaporação existentes, a faixa de valores dos números de Schmidt estão no intervalo de $0,6 < Sc < 3,0$. Entre as principais substâncias usadas destacam-se a água e o álcool N-Butil. Quando o ar atmosférico é o meio de propagação para o transporte da massa, o número de Schmidt varia de 0,6 para o vapor de água a 1,86 para o álcool N-Butil e se o número de Prandtl referente ao processo de transferência de calor for semelhante ao número de Schmidt, tem-se a razão Pr/Sc de ordem unitária. Sendo assim, o expoente que envolve essas quantidades não será um parâmetro crítico. Portanto no método de evaporação, o desenvolvimento das camadas limites de calor e de massa não apresentam diferenças significativas. Esse fato permite aplicar a analogia entre a transferência de calor e de massa no estudo do transferência de calor desde que se tenha número de Prandtl na faixa de $0,6 < Pr < 3,0$. Para valores de Prandtl fora desse intervalo é recomendável utilizar outro método de transporte de massa.

2.3.2. MÉTODO DE SUBLIMAÇÃO

O método de sublimação consiste em medir a massa sublimada da superfície para avaliar o coeficiente de transferência de massa.

Para usar o método de sublimação deve-se cobrir a superfície do corpo de prova com uma substância que sublima facilmente. Ao ocorrer a sublimação pode-se avaliar as mudanças de dimensões da superfície, decorrentes do transporte de massa, ao usar as técnicas de medições de perfil, fotográficas ou indutivas. Deve-se planejar o ensaio para transferir pouca massa da superfície para o escoamento, pois uma transferência de massa grande irá alterar as dimensões e a forma da superfície, mudando as condições locais de escoamento. As principais substâncias sublimáveis são : gelo, iodo, cânfora, diclorobenzeno, dibromobenzeno, cloreto de amônio, naftaleno e timol, onde o naftaleno destaca-se entre elas. A base para a técnica experimental de sublimação foi desenvolvida por Frosling, apud Kottke [5] em 1938, ao usar a capacidade de sublimação do naftaleno.

A sublimação do naftaleno apresenta como vantagem a possibilidade de determinar de modo simples a quantidade de massa transferida para o escoamento ao analisar a alteração geométrica do perfil. Com essa técnica obtêm-se bons resultados para os coeficientes de transferência de massa local e global. Neste caso, há necessidade de se fabricar um molde e utilizar o processo de fundição para moldar o naftaleno na superfície de teste .

Um resumo dos trabalhos que utilizaram as técnicas de sublimação do naftaleno foi levantado por Bayon [16], estando indicadas na tabela 2.12.

Tabela 2.12, Aplicabilidade das técnicas de sublimação do naftaleno

Temas	Referência
Estudo da transferência de calor na região de estagnação de discos circulares.	27, 28, 29
Estudos da transferência de calor em placa plana retangular com ângulo de ataque variável em relação ao escoamento	30
Estudo da transferência de calor ao redor de um cilindro circular perpendicular ao escoamento	31,32
Estudo da transferência de calor ao redor de prismas quadrados com diferentes ângulos de ataque e ao redor de arranjo de prismas retangular	33, 34
Estudo da transferência de calor sobre superfícies planas e em dutos com arranjo alinhados e alternados.	35, 36, 37
Extensão do estudo anterior para diferentes formas de aleta na procura de aumento das taxas de transferência de calor	38, 39
Estudo da transferência de calor em arranjo de placas periodicamente interrompida alinhadas ao escoamento no interior de dutos	40
Estudo da transferência de calor sobre placas planas, sobre as paredes de dutos de secção retangular, quadrada e anelar.	41, 42, 43, 44, 45
Estudo da intensificação da transferência de calor em dutos com ribs em forma de barras de secção quadrada e circular e em arranjo de aleta planas	46, 47, 48, 49
Estudo da transferência de calor sobre as paredes de dutos com corrugações periódicas	50,51
Extensão do estudo anterior a modelos de componentes eletrônicos	52
Estudo da transferência de calor em leitos fluidizados	53
Estudo da transferência de calor na região entre pás de turbina de gás	54
Estudo da transferência sobre elementos em movimentos, tais como discos, cilindros e anéis em rotação.	55, 56, 57, 58, 59, 60
Estudo da transferência de calor em convecção natural sobre diferentes geometria	61, 62, 63, 64

Descrição dos métodos e propriedades.

Tendo em vista a necessidade de cobrir a superfície de ensaio com substâncias sublimáveis pode-se cobri-la com uma película de naftaleno através da técnica de spray, ao dissolver anteriormente o naftaleno em um solvente, ou obter a superfície de ensaio ao usar um processo de fundição. Uma vez recoberta a superfície, deve-se expô-la a um escoamento que provocará a sublimação (cuja taxa dependerá dos fatores, temperatura e velocidade do escoamento). Como resultado da sublimação tem-se uma alteração do perfil da camada sublimável, que é usada para calcular o coeficiente de transferência de massa.

O naftaleno é um composto sólido do grupo dos hidrocarbonetos aromáticos, sublimando à pressão normal de 1,01325 bar, é atóxico e não oxidante.

A densidade do vapor saturado do naftaleno é determinado pela equação do gás perfeito usando para os cálculos o valor da pressão do vapor saturado e a temperatura da superfície. A pressão do vapor saturado do naftaleno tem sido determinada em muitos estudos, contudo Goldstein [15] fez uma comparação dessas correlações observando que as diferenças entre elas são da ordem de 7% recomendando utilizar para estudos envolvendo a sublimação do naftaleno a correlação de Ambrose apud Goldstein [15], cujos resultados ficaram na média do conjunto. A faixa de incertezas dessas correlações é de 3,77%, a uma faixa de temperatura de 289-303 K. A pressão do vapor saturado de naftaleno é muito sensível à temperatura, chegando a variar em 10 % com a mudança de cada grau Celsius na temperatura. Portanto é necessário ter um cuidado especial para obter um valor exato da temperatura na superfície.

Métodos de cobrimento.

Os métodos capazes de cobrirem a superfície a ser testada incluem : usinagem, imersão, pulverização, fundição e a combinação entre eles.

Na tabela 2.13 tem-se uma descrição de cada método incluindo as desvantagens. Dentre eles destaca-se o método de fundição, sendo o mais utilizado nos experimentos.

Tabela 2.13, Principais métodos de cobrimento.

Métodos	Descrição	Desvantagem	Fonte
Usinagem	Usa-se um torneamento ou fresagem para fabricar o modelo de teste dos blocos de naftaleno obtidos por fundição ou imersão	Esforços são requeridos para fazer vários modelos idênticos e para obter a superfície polida. As propriedades físicas da superfície usinada pode variar devido ao processo de fundição	20, 21
Imersão	A peça é imergida dentro de um frasco contendo naftaleno líquido (NL)	Existem problemas em repetir o ensaio devido às dificuldades de se obter camadas de naftaleno com espessuras uniformes. É conveniente quando muitas peças pequenas são requeridas ex pin- fin arrays	22
Spray	O naftaleno fundido é pulverizado sobre a superfície obtendo-se uma camada com espessura de 0,015-0,115 mm. O naftaleno pode ser dissolvido em um solvente ou pulverizado junto com um ar aquecido	Pode ser usado para cobrir geometria complexas.	23, 24 25, 26
Fundição	É o método mais popular. A naftaleno fundido é despejada dentro de um molde permitindo uma solidificação. Ao separá-la do molde obtém-se o modelo de teste	É simples, possibilita obter moldagens semelhantes, apresenta como desvantagem a necessidade em fabricar um molde para cada tipo de modelo a ser ensaiado.	É utilizado na maioria dos experimentos

Análise quantitativa.

Existem em geral dois métodos para medir a transferência de massa :

- ▶ A pesagem : para a obtenção do coeficiente global (médio)

- ▶ Medições locais : obtidas utilizando-se um relógio comparador ou outro tipo de perfilômetro.

Nos métodos de pesagem obtém-se o coeficiente de transferência de massa ao pesar o modelo antes e após o ensaio. Nesse método é requerido uma alta resolução da balança sendo que o peso do modelo está restrito ao tipo de balança utilizada. Na prática utiliza-se balança analítica com 0,1 mg de resolução, a qual pode ter um erro menor que 1% (em volta de 50 mg sublimadas) e capacidade até 200 g. Quando necessário o modelo poderá ser decomposto em várias partes, onde cada parte integrante será fundida e medida individualmente sendo cada pedaço leve o suficiente, de acordo com a capacidade da balança.

Os métodos de medições locais estão bem desenvolvidos para medir o coeficiente de transferência de massa local em superfícies planas, circulares, cilíndricas, superfícies curvas de contorno simples e dentro de cavidades. Para medições locais as extremidades de superfícies não sublimáveis (parte de metal) servem de referência para localização dos pontos sublimáveis . O tamanho do modelo está limitado pelo espaço (comprimento e largura) da mesa de medição. Valores locais detalhados podem ser obtidos na maioria das partes do modelo. Sistemas automáticos de medições da superfície podem ser usados para medir o perfil do naftaleno sobre a superfície . Os seguintes fatores são cruciais para se obter profundidades reais de sublimação local na superfície do naftaleno :

- 1- Posições precisas do modelo antes e após à exposição ao escoamento.
- 2- Medições precisas das profundidades.
- 3-Adquirir rapidamente os dados para minimizar as perdas por convecção natural.

Para satisfazer esses objetivos, desenvolveram-se na última década diferentes tipos de medições computadorizados :

- ▶ Mesas x-y
- ▶ Mesas rotacionais
- ▶ Mesas com quatro eixos.

Os sistemas automáticos de medição obtém por volta de 2000 mil pontos por hora. Contudo para determinar o coeficiente de transferência de massa por esse sistemas deve-se medir o perfil do modelo de naftaleno antes e após o ensaio. A diferença entre os valores medidos em cada ponto indicará a profundidade de naftaleno sublimado. A duração do tempo de ensaio é determinado pela profundidade sublimada. A profundidade deverá ser suficiente para minimizar os erros de medições devido a convecção natural. Cada tempo de ensaio é então selecionado para que a profundidade média da superfície sublimada esteja na faixa de 0,038 a 0,05 mm. A profundidade sublimada tem ordem de grandeza de dois a três em relação aos erros de medições. As perdas por convecção natural são geralmente menores que 5% da profundidade sublimada, mas em alguns pontos chegam a 10%. A taxa de sublimação depende do número de Reynolds (velocidade do escoamento de ar), temperatura da superfície de naftaleno (pressão do vapor do naftaleno), e da geometria do modelo. À temperatura ambiente de 24 °C, o tempo de ensaio está na faixa de 30 à 120 minutos dependendo do número de Reynolds e da geometria do modelo. Um tempo de ensaio maior que duas horas deverá ser evitado devido a dificuldade de se manter a temperatura da superfície constante.

Limitações dos métodos de sublimação.

O método de sublimação do naftaleno tem sido aplicado ultimamente em muitos experimentos, contudo existem várias limitações que devem ser levantadas e analisadas para aplicabilidade do método. Um resumo das principais limitações é fornecido por

Goldstein [15], dentre elas destacam-se:

- ▶ Em escoamento de baixa velocidade o tempo de ensaio torna-se grande, dificultando o controle das variações de temperatura.
- ▶ Durante o ensaio, a forma da superfície do modelo de naftaleno muda gradualmente devido a sublimação. Portanto, a duração da exposição do modelo deve ser controlada para minimizar o efeito no escoamento devido às mudanças na forma do modelo.
- ▶ A técnica de sublimação do naftaleno oferece apenas valores médios no tempo, já que os resultados apenas são medidos no final do teste. Valores transientes, em larga escala, devem ser obtidos por métodos de visualização.
- ▶ Com a técnica de sublimação de naftaleno podem ser obtidas condições de contorno análogas às condições de superfícies isotérmicas e adiabáticas, mas não é possível obter a condição de fluxo de calor constante, nem tão pouco testes com propriedades variáveis.

Conclusões sobre a técnica de sublimação.

Existem muitos trabalhos referentes a utilização da técnica de sublimação do naftaleno . Essa técnica de transferência de massa tem muitas vantagens, desde a fabricação de modelos até a obtenção de resultados com boa exatidão. Este método é particularmente de grande utilidade no estudo de superfícies complexas, onde se tem grandes gradientes de transferência de calor ou de massa na superfície . Ele permite obter condições de contorno precisos, eliminando erros de condução associados a experimentos análogos de transferência de calor.

2.4 TRANSFERÊNCIA DE MASSA DO ESCOAMENTO PARA A SUPERFÍCIE

Os métodos de avaliação do coeficiente de transporte de massa do escoamento para a superfície são classificados, conforme a mudança de fase, em métodos de absorção e métodos de adsorção. Nesses métodos a grandeza medida é a densidade de massa absorvida pela superfície, b , termo que expressa a relação entre a quantidade de massa transferida para a superfície por unidade de área. Contudo essa seção abordará apenas sobre os métodos de absorção. Detalhes dos métodos de adsorção podem ser obtidos através da análise das referências bibliográficas de Kottke [3, 5].

Os métodos de absorção consistem em cobrir a superfície com uma substância que possibilite absorver e identificar a porcentagem de massa transferida do escoamento para a superfície. Ao calcular a densidade de massa absorvida obtém-se o coeficiente de transferência de calor através de relações de analogia entre os processos de transferência de calor - massa. Os métodos de absorção são definidos de acordo com o procedimento utilizado para determinar a densidade de massa na superfície. Para empregá-lo, deve-se definir : o tipo de gás reagente e como esse gás será transportado, qual o composto a ser utilizado para cobrir a superfície, bem como os elementos reativos a serem usados na superfície para identificar a massa absorvida . Na tabela 2.14 tem-se um resumo dos métodos de absorção onde destaca-se algumas técnicas de medição usadas para determinar a quantidade de massa transferida do escoamento.

Tabela 2.14, Métodos para medir o transporte de massa com transferência de massa do escoamento para a superfície.

Métodos para medir a transporte de massa	Grandeza medida	Técnica de medição	Faixa de valores dos números de Sc
Absorção com reações químicas	Concentração do ácido	Análise química Titulação.	0,6 a 3
	Densidade de massa na superfície $h_m = \frac{b}{\rho_{A\infty} \cdot t}$	Fotométricas.	
Absorção com reações químicas e intensidade de cor	Densidade de massa na superfície $h_m = \frac{b}{\rho_{A\infty} \cdot t} = \frac{b \cdot V_L}{M_A}$	Fotométrico. Tratamento de imagem	0,6 a 3

Com o objetivo de facilitar o entendimento e analisar o desenvolvimento do método de absorção, este capítulo está estruturado em dois tópicos, métodos de absorção somente com reações químicas e métodos de absorção com reações químicas e intensidade de cor.

2.4.1 MÉTODOS DE ABSORÇÃO COM REAÇÕES QUÍMICAS

Os métodos de absorção com reações químicas permitem determinar o coeficiente de transferência de calor-massa e visualizar os escoamento em muitos casos. O processo físico-químico desta técnica consiste em cobrir a superfície com um ácido e expô-la a um elemento reativo. Após o processo de absorção calcula-se a quantidade de massa absorvida

através de técnicas de titulação.

Para determinar o coeficiente de transferência de calor global, Thoma apud Eckert [2] desenvolveu a técnica de absorção ao determinar por titulação a quantidade de amônia absorvida pelo ácido fosfórico na superfície de um tubo. Esse mesmo procedimento foi verificado e utilizado em grande escala por Lohrisch apud Eckert [2], usando um túnel de vento. O esquema do túnel de vento usado por Lohrisch para visualizar o escoamento em torno de um feixe de tubos e determinar o coeficiente de transferência de calor esta indicado na figura 2.3.

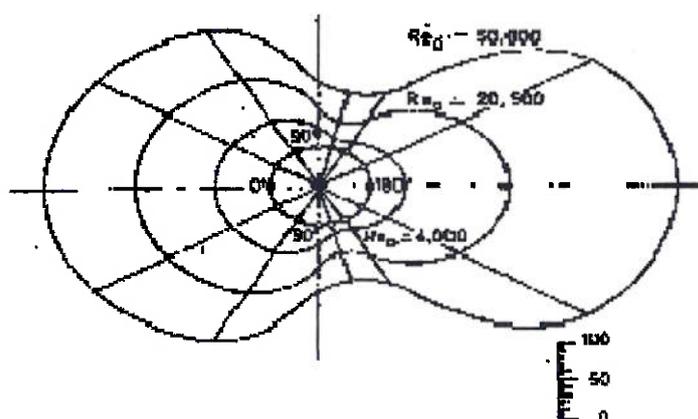


Figura 2.3, Distribuição do número de Nusselt ao redor de um tubo. Determinado pela analogia de transferência de massa.

Lohrisch obteve o coeficiente de transferência de calor médio e local ao titular separadamente cada intervalo da superfície. A distribuição do número de Nusselt ao redor de um tubo posicionado perpendicular ao escoamento está representada pela figura 2.4.

Rejmon apud Krückels [4] introduziu o conceito de que se a camada cristalizada na superfície for submetida a um indicador alaranjado de metila ela mudará de cor e poderá ser fotografada. Neste caso o método fornece informações qualitativas a respeito da distribuição da transferência de massa local, mas mesmo assim a análise química se torna

necessária para identificar a quantidade de massa absorvida pela superfície.

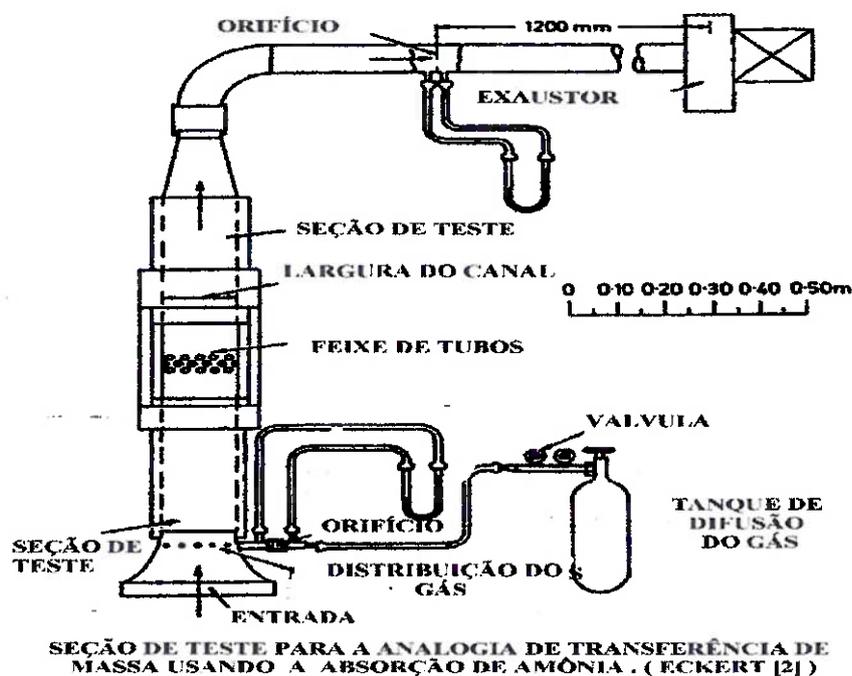


Figura 2.4 Túnel de vento para análise da transferência de massa usando absorção da amônia. Eckert [1].

A tabela 2.14 fornece um resumo dos principais autores que contribuíram para o desenvolvimento dos métodos de absorção por reações químicas.

Presser [17] expandiu o método desenvolvido por Thoma (1921) ao substituir o ácido fosfórico por diferentes tipos de ácidos e ao empregar medições fotométricas para determinar a quantidade de ácido residual. Em seus estudos Presser [17] substituiu o ácido fosfórico por ácido sulfúrico, ácido oxálico e ácido amido sulfúrico, expandindo e estruturando a qualificação e faixas de utilização desses ácidos de acordo com a taxa de reação química e velocidade do fluido. Um resumo dos ácidos analisados encontra-se na tabela 2.15.

Após o processo de absorção do gás, separa-se do filtro de papel a quantidade de ácido que não reagiu (ácido residual). A neutralização do ácido residual é realizada dentro

do balão de Erlenmeyer, introduzindo hidróxido de amônio.

Tabela. 2.14, Principais contribuições nos métodos de absorção.

Mistura	Superfície coberto com	Após a absorção	Análise química	Autor
Ar + amônia	Filtro de papel contendo ácido fosfórico	Ácido residual + fosfato de amônio	Titulação do ácido no filtro de papel	Thoma 1921
Ar + amônia	Várias tiras de filtro de papel contendo ácido fosfórico	Ácido residual + fos. de amônia	Titulação do ácido em cada tira de papel	Lohrisch 1929
Ar + amônia	Filtro de papel contendo ácido fosfórico	Ácido residual + fosfato de amônio	Titulação + indicador de ph + análise fotométrica	Scneller Rejmon 1965
Ar + amônia	Filtro de papel contendo sal de manganês + peróxido de hidrogênio	Hidróxido de manganês	medições fotométricas + solução de revelação	Krückels 1967
Ar + amônia	Utilizou diversos ácidos para impregnar o filtro de papel	Ácido residual + composto de acordo com o ácido	Titulação + indicador de ph + análise fotométrica	Presser 1971

Tabela 2.15, Relação dos principais ácidos analisados por Presser [17]

Ácido apropriado	Velocidade do escoamento	Taxa de reação química
Ácido sulfúrico Amido sulfúrico	até 20 m / s	de 20 á 50 %
Ácido sulfúrico	maiores que 20 m / s	acima de 25 %
Ácido fosfórico Ácido oxálico	não são apropriados para escoamento turbulentos	

Após a reação de neutralização utiliza-se um indicador de pH (potencial de hidrogênio) para alterar a cor da substância. Diante dessa nova cor, a quantidade de ácido residual é determinada por medições fotométricas. As reações de neutralização dos ácidos

e os indicadores de pH analisados por Presser [17] estão indicados nas Tabelas 2.16 e 2.17.

Tabela 2.16, Equações de reações iônicas pela neutralização de diferentes ácidos

Tipo de ácido	Reação química
Ácido fosfórico H_3PO_4	a) $H_2PO_4^- + H^+ + NH_3 \rightarrow NH_4 \cdot H_2PO_4$ b) $H_2PO_4^- + H^+ + NH_4^+ + OH^- \rightarrow NH_4H_2PO_4 + H_2O$
Ácido sulfúrico H_2SO_4	a) $SO_4^{2-} + 2H^+ + 2NH_3 \rightarrow (NH_4)_2SO_4$ b) $SO_4^{2-} + 2H^+ + 2NH_4^+ + 2OH^- \rightarrow (NH_4)_2SO_4 + 2H_2O$
Ácido oxálico $H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$	a) $C_2O_4^{2-} + 2H^+ + 2NH_3 \rightarrow (NH_4)_2C_2O_4$ b) $C_2O_4^{2-} + 2H^+ + 2NH_4^+ + 2OH^- \rightarrow (NH_4)_2C_2O_4 + 2H_2O$
Ácido amido sulfúrico H_2NSO_3H	a) $H_2NSO_3^- + H^+ + NH_3 \rightarrow H_2NSO_3NH_4$ b) $H_2NSO_3^- + H^+ + NH_4^+ + OH^- \rightarrow H_2NSO_3NH_4 + H_2O$

a) com amônia durante o processo de absorção do gás.

b) com hidróxido de amônia em um balão de Erlenmeyer

Tabela 2.17, Relação dos indicadores.

Ácidos	Base	Indicador	Nitidez	Observação
Fosfórico	hidróxido de amônia	alaranjado de metila	pouca	a cor na região ácida é vermelho, alterando para laranja e na região alcalina é laranja - amarelado
Sulfúrico		alaranjado de metila	boa	
Amido sulfúrico		alaranjado de metila	boa	
Oxálico		neutral-vermelho	boa	

Os ácidos e bases, ao serem normalizados, garantem a repetibilidade do experimentos. A normalização é obtida no processo de neutralização através de relações

estequiométricas. As relações estequiométricas tem um papel decisivo na determinação da transferência de massa, podendo-se utilizá-las no início e ou fim de cada ensaio. A definição das principais relações estequiométricas estão apresentadas na tabela 2.18.

Tabela 2.18, Relação estequiométricas usadas nos experimentos de transferência de massa..

Relações estequiométricas	Interpretação
$\Gamma = \frac{V_B}{V_S} = \frac{N_S}{N_B} = \frac{a_S \cdot \rho_S}{M_{\bar{A}S}} \frac{M_{\bar{A}B}}{a_B \cdot \rho_B}$	relação estequiométrica para o calculo do coeficiente de transferência de massa
$\Gamma_1 = \frac{N_S}{N_B}$	relação entre as normalidades do ácido e base onde N_S é determinado com uma solução de 0,2 N de NaOH e N_B a 0,1N de H_2SO_4
$\Gamma_2 = \frac{V_B}{V_S}$	relação entre os volumes dos ácidos e bases
$\Gamma_3 = V_B / \left(\frac{G_S}{\rho_S} \right)$	incluindo a massa do ácido com o filtro de papel
$\Gamma_4 = V_B / \left(\frac{G_S}{\rho_S} \right)$	cálculo do G_S com o escoamento de ar puro devendo permanecer no túnel durante 500 segundos.

As equações básicas utilizadas por Presser [17] no estudo da transferência de massa usando a técnica de absorção são apresentadas na tabela 2.19.

Presser [17] contribuiu de forma expressiva para a evolução dos métodos de absorção por reações químicas, pois além de analisar o uso do ácido fosfórico nos processos de absorção, qualificou e estruturou a faixa de utilização de um conjunto de ácidos. Nos experimentos Presser [17] analisou o escoamento em uma placa plana e cilindro anular para uma faixa de Reynolds de $7 \cdot 10^3 < Re < 3 \cdot 10^5$ com uma variação de

velocidade de 1 a 60 m/s.

Tabela 2.19 Resumo das equações usadas por Presser

Descrição	Equações	Observações
Quantidade de ácido no papel	$G_{S1} = (G_f - G_{tr}) \cdot a_s$	G_{tr} e G_f , foram medidos com uma precisão de $\pm 0,1$ ml
Quantidade de ácido residual após a absorção do gás	$G_{S2} = \frac{V_B \cdot a_s \cdot \rho_s}{\Gamma}$	
Quantidade de ácido transformado	$\Delta G_s = G_{S1} - G_{S2}$	
Porcentagem de ácido transformado	$f = \frac{\Delta G_s}{G_{S1}}$	
Massa do gás reagente	$G_{RG} = \Delta G_s \cdot \varphi \cdot \frac{M_{RG}}{M_s}$	o valor de φ para o ácido fosfórico e 1, e sendo 2 para o ácido oxálico e sulfúrico
Densidade parcial	$\Delta \rho_p = \frac{\rho_{P1} - \rho_{P2}}{\ln \frac{\rho_{P1}}{\rho_{P2}}}$	
Calculo do coeficiente de transferência de massa	$m = \frac{G_{RG}}{S \cdot t} = h_m \cdot \Delta \rho_p$	
Coeficiente de difusão	$D = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 \left(\frac{P}{P_0} \right)$	$D_0 = 23,2 \cdot 10^{-6}$ $T_0 = 295$ K $P_0 = 1,0132$ [bar]
Porcentagem de gás reagente transformado	$e = \frac{Sh}{Sc \cdot Re} \frac{S(x-1)/x}{F \ln x}$	$x = \rho_{P1} / \rho_{P2}$ S = área da superfície F = área da secção transversal
Parâmetros adimensionais para a analogia	$\frac{h_c}{h_m} = \frac{1}{k_h} \rho \cdot c_p \cdot Le^{1-n}$	$k_h = 1$ para as pressões parciais da amônia menor do que 100 N / m ² , o número de $Le \approx 1$

2.4.2. ABSORÇÃO COM REAÇÕES QUÍMICAS E INTENSIDADE DE COR.

Esse método relaciona a densidade de massa absorvida pela superfície com a intensidade de cor resultante das reações químicas. Para avaliar a intensidade de cor usa-se os princípios de absorção ou reflexão da luz através de medições fotométricas. Esse procedimento para calcular o coeficiente de transferência de massa local foi desenvolvido e aperfeiçoado no Instituto de Engenharia Química (ICV) da Universidade de Stuttgart.

a) METODOLOGIA DE KRÜCKELS

Krückels [4] contribuiu para a evolução dos métodos de absorção ao desenvolver um método experimental que permite analisar a densidade de massa absorvida pela superfície por intermédio de medições fotométricas e reações químicas. A densidade de massa absorvida era determinada por métodos de análises químicas e por intermédio de titulações. A partir do método desenvolvido por Krückels [4, 9] elas passam a serem relacionadas com a intensidade das cores formadas após o processo de absorção.

Obtenção de camadas coloridas

Para obter a formação da cor, deve-se cobrir a superfície da folha suporte¹ com uma solução de reação. Coloca-se a folha suporte dentro de um distribuidor de gás e aplica-se o gás reagente (amônia) . Quando a amônia reage com a solução de reação forma-se hidróxido de manganês na superfície . Após essa etapa faz-se o processo de secagem das folhas obtendo uma camada estável que pode ser guardada sem alterar as característica básicas. Imediatamente, antes da avaliação fotométrica, as folhas são reveladas. A

¹Krückels escolheu o papel como folha suporte devido à facilidade para o desenvolvimento da reação e devido a uniformidade capilar permitindo maior dispersão do dióxido de manganês formado.

revelação é obtida ao embeber as folhas, com o lado de teste para baixo, na solução de revelação. Os detalhes de cada procedimento estão indicados na tabela 2.20.

Tabela 2.20, Relação dos componentes utilizados obter o processo de absorção

Solução para a reação	5 gramas de cloreto de manganês dissolvidos em 100 ml de água destilada, antes do experimento adicionar 5% de peróxido de hidrogênio, essa solução tem a duração de três dias pois o peróxido de hidrogênio entrará aos pouco em decomposição. Essa mistura é homogênea, absorvedora e transparente.
Solução para a revelação	0,5 gramas de acetado de benzidina misturado com 5 ml de vinagre gelado completando com água destilada até formar 100 ml de composto. A essa substância adicionar 1 gota de tensoativo que diminuirá a possibilidade da camada formada desmanchar, após a filtração essa solução estará resistente por alguns meses se for guardada na ausência de ar.
Gás reagente	O gás reagente 'A" deve ser muito solúvel em água garantindo que ao chegar na superfície deva reagir com uma alta velocidade com os componentes da solução de reação formando uma matéria sólida, intensamente colorida e com estabilidade química que possa ser relacionada com medições fotométricas.
Folha suporte	Para utilizar grau de transmissão a folha precisa ser inerte ao material químico, transparente, homogêneo, poroso e absorvedor. Recomenda-se usar papel cromato gráfico e com certas limitações folhas de acetato de celulose.
Observações	Por causa da coloração castanha do hidróxido de manganês ele será utilizado na solução aquosa para provar a presença da amônia, além disso apresenta um forte resultado de oxidação e ao ser utilizado com acetato de benzidina surge a formação de uma cor mais intensa que para medições fotométricas representa uma diminuição no grau de transmissão de cores.

Calibração.

Krückels [4, 9] obteve valores definidos da densidade de massa absorvida na folha suporte ao usar o aparato de ensaio descrito pela figura 2.5, O procedimento consiste em fixar uma lâmina de teste dentro de um distribuidor de gás e calcular a densidade de massa na superfície de acordo com o volume transferido da câmara intermediária para o distribuidor de gás em função do deslocamento do mercúrio na bureta.

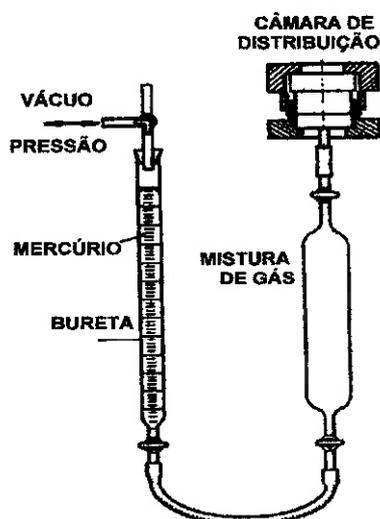


Figura 2.5 Aparelho de teste usado por Krückels [9] para determinar a densidade de massa sobre a folha de teste

A figura 2.6, mostra um detalhe da câmara de distribuição. A tabela 2.21 fornece detalhes de cada componente usado na técnica de ensaio por Krückels [4, 9], para a obtenção de uma relação experimental entre a cor formada sobre a lamina de ensaio em função da massa de gás transferida para o distribuidor.

Após a revelação mede-se o grau de transmissão de cada folha suporte por intermédio

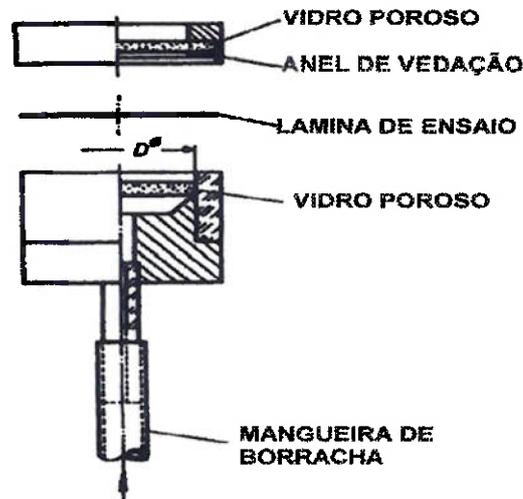


Figura 2.6 Detalhe do distribuidor de gás para a absorção de gás uniforme sobre a lamina de ensaio.

de um fotômetro, (figura 2.7). Com isso obtém-se diversos valores entre intensidade de cor formadas com a densidade de massa absorvida .

Krückels [4] obteve uma relação funcional entre a densidade de massa na superfície e a coloração da camada formada usando um método ótico, onde preferiu utilizar o grau de transmissão τ , devido a maior exatidão e simples manuseio, conseguindo resultados mais uniformes

Após a calibração, a quantidade de gás amônia transferida para uma superfície pode ser calculada diretamente por intermédio do grau de transmissão. Krückels obteve uma correlação com graus de transmissão médios entre $0,20 < \tau < 0,80$, com 5% de dispersão. A partir da obtenção da curva de calibração entre a densidade de massa absorvida e o grau de

transmissão ótica, calcula-se o coeficiente de transferência de massa equação da tabela 2.22, determinando-se o coeficiente de transferência de calor, através de analogia calor - massa .

Tabela 2.21 Detalhes dos componentes utilizados na técnica de ensaio por Krückels

Estruturas e grandezas	Descrição	Observações
Bureta	A bureta fornece o volume V_x que será transportado para a câmara de distribuição	O volume é calculado pelo deslocamento do mercúrio contido na bureta
Câmara intermediária	Na câmara intermediária têm-se a mistura da amônia com o ar (V_{ges})	A amônia é misturada com o ar através do processo de convecção
Câmara de distribuição	A folha suporte é fixada entre duas camadas finas de vidro sinterizado	Usa-se um anel de borracha para separar a folha dos vidros
Volume do gás	O volume do gás é transportado para a câmara intermediária por intermédio de uma seringa	A quantidade de gás deve ser transferida e calculada com boa precisão
Densidade de massa absorvida	A densidade de massa é calculada por $b = \frac{V_A}{V_{ges}} \cdot V_x \cdot \frac{\rho_A}{S_o}$	Obtém-se um b para cada folha analisada de acordo com o volume V_x transferido

Observa-se após o desenvolvimento do método de Krückels que o coeficiente de transferência de calor é obtido facilmente por métodos de transferência de massa. A dificuldade em analisar estruturas complexas nos processos de absorção foram reduzidas ao substituir a titulação e análise química por procedimentos de calibração entre a quantidade de massa transferida e a intensidade de cor formada obtida por métodos ópticos. Contudo essa técnica ainda pode ser melhorada, e esse melhoramento foi obtido por Kottke [10].

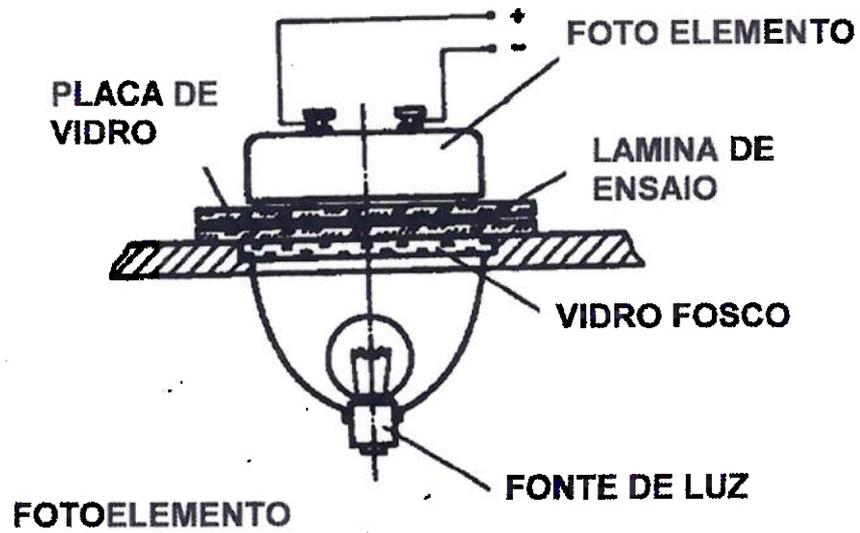


Figura 2.7 Fotômetro para determinar o grau de transmissão usado por Krückels [9]

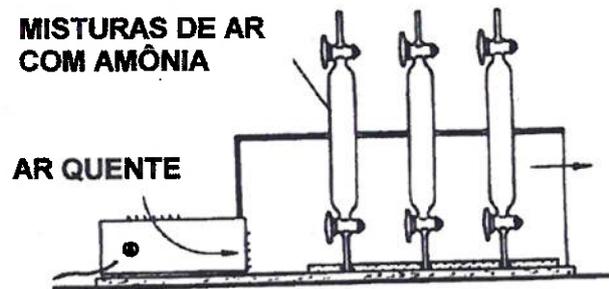


Figura 2.8 Dispositivo para misturar o gás contido na garrafa
Tabela 2.22, Equações para determinar a transferência de massa

Grandezas	Equação	Descrição
Massa transferida	$\dot{m}_A = h_m \cdot \Delta\rho_A$	Equação para determinar a massa transferida
Diferença das densidades parciais	$\Delta\rho_A = \rho_{A\infty} - \rho_{AO}$	Diferença entre as densidades do escoamento e da superfície, a superfície ao absorver toda a massa vindo do gás ρ_{AO} será zero
Coefficiente de transferência de massa	$h_m = \frac{b}{\int_0^{t_v} \rho_{A\infty} \cdot dt}$	O coeficiente de transferência de massa é proporcional a densidade de massa na superfície
Densidade de massa absorvida	$b = m_A = \int_0^{t_v} \dot{m}_A \cdot dt$	Verifica-se por técnicas de ensaio

b) METODOLOGIA DE KOTTKE

O método proposto por Kottke [10] é um aperfeiçoamento da técnica desenvolvida por Krückels [4, 9, 18,] que possibilita determinar o coeficiente local de transferência de massa por medições fotométricas. A diferença básica entre esses dois métodos é que Kottke [10, 20, 21, 22] usa a refletância da luz para avaliar a densidade de massa absorvida e realiza a calibração em situações onde o coeficiente de transferência de calor é bem conhecido. O método é caracterizado por: manuseio simples, exatidão dos valores locais e alta resolução ao utilizar a analogia entre calor-massa, permitindo investigar a distribuição do coeficiente local de transferência de massa em superfícies de formatos irregulares. O princípio físico químico dessa técnica consiste em usar reações químicas para converter a amônia absorvida pela superfície em um novo produto, cuja intensidade da cor formada, após o processo de absorção, indique a quantidade de massa absorvida.

A porcentagem de amônia que chega à superfície irá reagir com o cloreto de manganês, ($MnCl_2$) na solução aquosa, formando hidróxido de manganês $Mn(OH)_2$. A introduzir o peróxido de hidrogênio, H_2O_2 , na reação consegue-se acelerar o processo de oxidação do hidróxido de manganês até a formação completa do óxido de manganês, MnO_2 . Esse óxido formado é estável quimicamente, ficando fixo na superfície. Após a secagem da folha suporte, pode-se avaliar a intensidade de cor formada na superfície usando-se medições fotométricas. Para cada sistema, fotográfico ou de vídeo, deve-se obter uma função entre a massa de amônia absorvida e uma grandeza fotométrica, refletância (R). Para determinar a massa de amônia absorvida, pode-se relacionar o coeficiente de transferência de massa com o coeficiente de transferência de calor em situações onde a transferência de calor seja bem conhecida. Kottke [10, 20] conduziu essa calibração utilizando o valor do número de Frösling, para o coeficiente de transferência de massa, de diversos escoamento, dentre eles, do ponto de estagnação de um escoamento perpendicular a um disco.

Princípio para determinar o coeficiente de transferência de massa.

Ao analisar o escoamento usando um túnel de vento pode-se calcular o coeficiente de transferência de massa pela expressão:

$$h_m = \frac{b \cdot V_L}{M_A} \quad (2.33)$$

Contudo, para usar essa expressão deve-se :

- ▶ Medir a quantidade de massa de gás, M_A , adicionada no túnel de vento.
- ▶ Determinar a densidade de massa absorvida pela superfície, b .

- Calcular a vazão de ar V_L , que passa no túnel.

Após determinar o coeficiente local de transferência de massa é possível calcular a distribuição do número de Nusselt pela expressão :

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n = \left(\frac{D_A}{a}\right)^n = Le^{-n} \quad (2.34)$$

Como exemplo para determinar o coeficiente de transferência de massa tem-se, dos resultados fornecidos por Kottke [20], que para o ar o valor do número de Schmidt é semelhante ao número de Prandtl ou seja $Sc = Pr = 0,712$. Calcula-se o coeficiente de difusão da amônia no ar a uma pressão de 988 mbar e uma temperatura de 20 ° C e número de $Sc = 0,616$. O número de Lewis da mistura de ar com a amônia vale $Le = 0,862$. Para camada limite laminar o valor do expoente n vale $n = 0,37$ e para camada limite turbulenta $n = 0,6$. Ao substituir esses dois valores na expressão acima e calculando a média conclui-se que a distribuição do número de Nusselt pode ser determinado, com um erro menor de 2%, por :

$$Nu = 1,07. Sh \quad (2.35)$$

e o coeficiente de transferência de calor é expresso por :

$$h = h_m. 0,302 \quad (2.36)$$

Túnel de vento

A figura 2.9 fornece o esquema do túnel de vento descrito nas referências de Krückels [18] Kottke [10, 21, 27] e Gaiser [26]. O túnel de vento possui uma contração da seção transversal na proporção de 5 : 1 e permite variar a intensidade de turbulência do escoamento ao permutar as grades de arame nesta seção. A válvula de controle de

dosagem adiciona o gás reagente no escoamento de ar em pequenos intervalos. A seção de teste tem altura de 200 milímetros, largura de 250 milímetros e comprimento de 1500 milímetros. A velocidade do escoamento pode ser ajustada entre 2 a 20 m/s. A região de entrada serve para homogeneizar os campos de velocidade e do perfil de concentração. A vazão de ar é determinada por intermédio de placas de orifício.

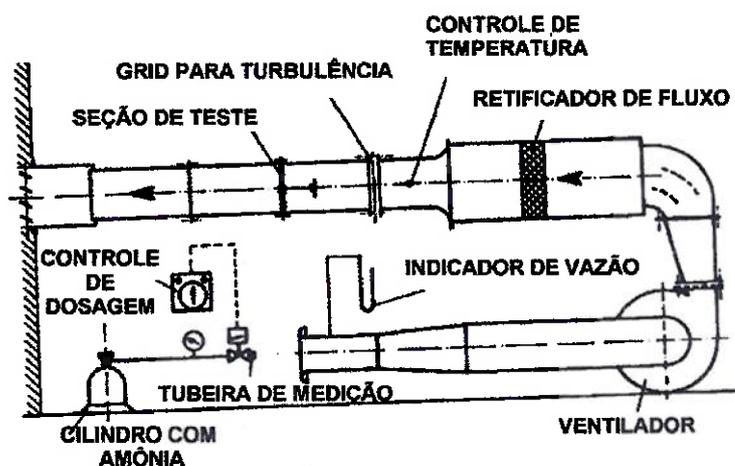


Figura 2.9 Túnel de vento com unidade de controle de dosagem

Quantidade de gás injetado

Deve-se definir o valor da massa de amônia a ser injetada no túnel de vento pois usa-se essa grandeza para determinar o coeficiente de transferência de massa, além do fato de que é importante manter a concentração da amônia abaixo dos limites tóxicos (50 a 100 ppm) para poder expelir essa mistura de ar com amônia para a atmosfera sem afetar o meio ambiente. Para controlar a dosagem de gás injetado, Kottke [26] usou uma válvula de controle de dosagem. A válvula de controle de dosagem permite injetar a amônia em pequenos intervalos de tempo e determinar a massa de gás injetada. Na figura 2.10 têm-se os resultados obtidos por Kottke [27] ao calibrar a válvula de controle de dosagem em

função do tempo, trabalhando com a amônia a 18°C graus, onde ficou estabelecido que a quantidade de gás reagente injetado é uma função linear da abertura da válvula. Na figura 2.11 têm-se uma função fornecida por Kottke [20] que representa a massa de amônia transferida para o túnel de vento para diversos campos de velocidade

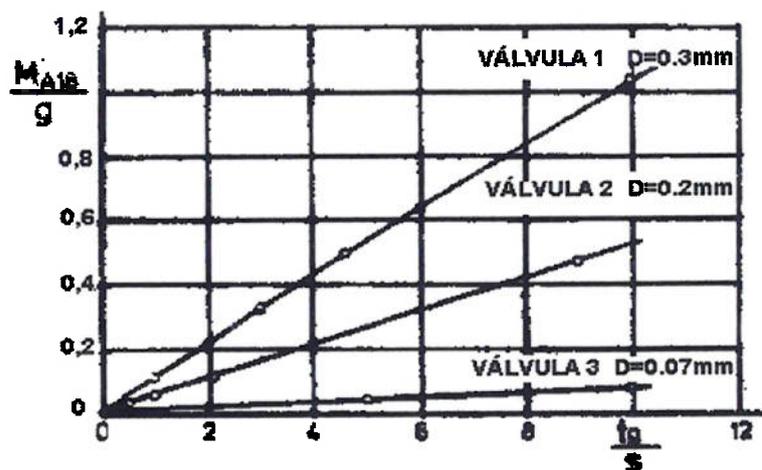


Figura 2.10 Calibração da massa de amônia injetada pela válvula de controle de dosagem.

Calibração por avaliação fotométrica

Os experimentos para a calibração são realizados com velocidade do ar constante. Para cada amostragem, ao variar a quantidade de amônia injetada no escoamento, obtém-se uma densidade de massa absorvida na superfície. Para cada densidade de massa avalia-se a refletância da luz correspondente. O construir um gráfico com as diferentes densidades de massa e suas respectivas refletâncias pode-se, por intermédio de uma interpolação numérica pode-se encontrar a função de polinômios correspondente.

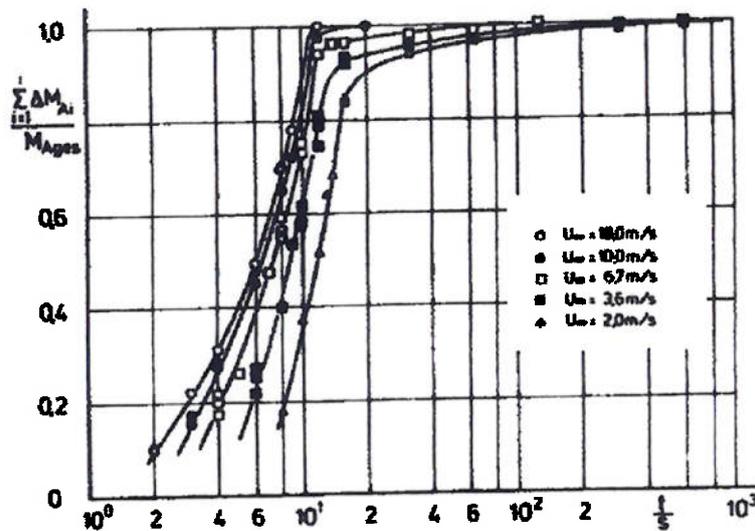


Figura 2.11 Relação entre a quantidade de amônia transferida para o túnel de vento e diversos valores de velocidades do escoamento.

Nos experimentos Kottke [20, 21] analisou diversas formas de escoamento, usando o filtro de papel para cobrir a superfície, ou aplicando o gel diretamente sobre a superfície. Em

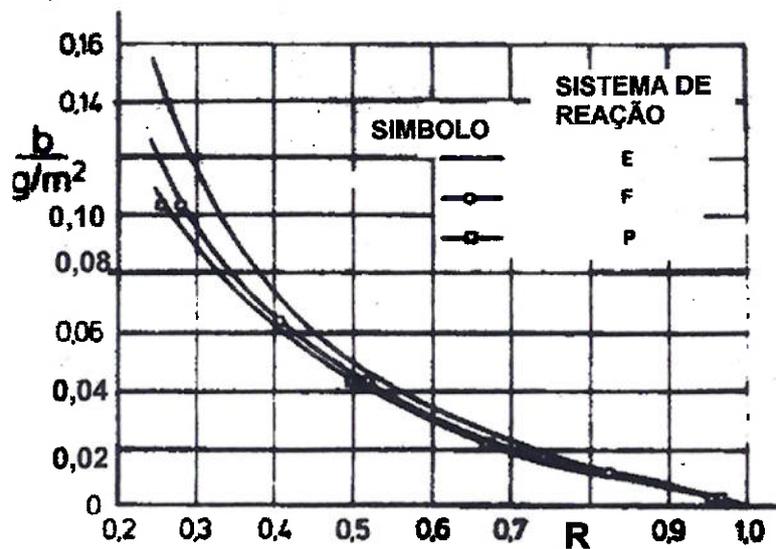


Figura 2.12 Densidade de massa na superfície (b) em função da refletância R .

todos os casos a função polinomial determinada foi do 5º grau. Os resultados da curva de

calibração obtida por Kottke [21] estão indicados na figura 2.12.

Uma vez obtida a curva de calibração pode-se calcular o coeficiente de transferência de calor local e ou global por intermédio da expressão abaixo, desde que os valores de Sc , Pr e Le sejam conhecidos.

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n = \left(\frac{D_A}{a} \right)^n = Le^{-n} \quad (2.37)$$

Na figura 2.13 tem-se os resultados obtidos por Kottke [10], para a calibração, ao usar a função de Kubelka.

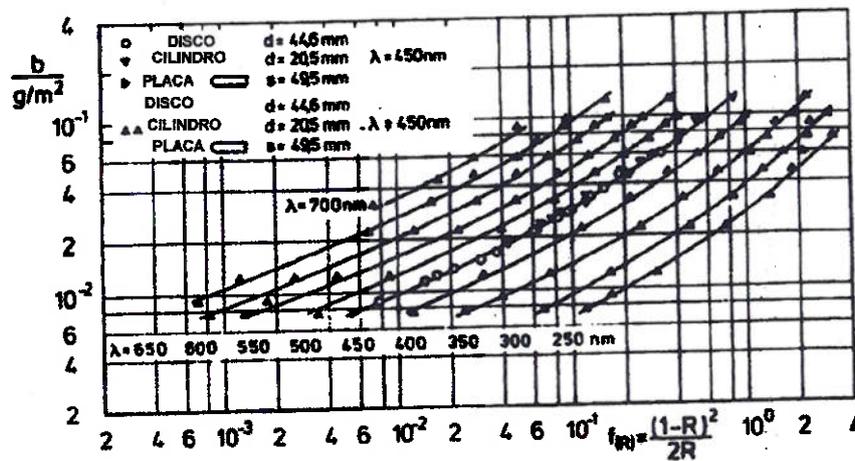


Figura 2.13 Relação entre a densidade de massa absorvida e a função de Kubelka para diversos comprimentos de onda.

Na tabela 2.24 apresenta-se um resumo dos componentes utilizados por Kottke [20] para o desenvolvimento das curvas de calibração.

Tabela 2.24, Relação dos principais componentes utilizados nos estudo de transferência de massa por medições fotométricas

Grandezas	Equações	Observações
Nº de Froesling Fr	$Fr = \frac{Sh}{\sqrt{Re}} = 0,612 \therefore Sh = \frac{h_m \cdot d}{D} = 0,672\sqrt{Re}$	é valido para $Sc=0,616$ e baixa intensidade de turbulência
densidade de massa na superfície	$b = h_m \int_{t=0}^{t_v} \rho_{A\infty} dt$	esse termo indica a quantidade de massa absorvida por unidade de área da superfície
densidade de massa usando um túnel de vento	$b = h_m \frac{M_A}{\dot{V}_L}$	V_L é a vazão do escoamento de ar e M_A é a quantidade de gás injetado no tempo t_v
densidade de massa usada para a calibração	$b = 0,672\sqrt{Re} \frac{M_A}{\dot{V}_L} \frac{D}{d}$	relação obtida ao relacionar Sh com b
densidade de massa, relacionada com a refletância	$b = k \left(\frac{(1-R)^2}{2R} \right)^p$	expressão modificada de Munk-Kubelka
Expressão obtida por métodos numéricos usando dados do ensaio ao relacionar a massa absorvida com o R	$b = \sum_{i=0}^5 B_i \cdot R^i$	$B_0 = 0,49327$ $B_1 = -2,29380$ $B_2 = +4,99753$ $B_3 = -6,04533$ $B_4 = +3,89752$ $B_5 = -1,04914$

Krückels e Kottke [19] usaram a técnica de absorção para analisar a distribuição do coeficiente de transferência de calor em trocador de calor.

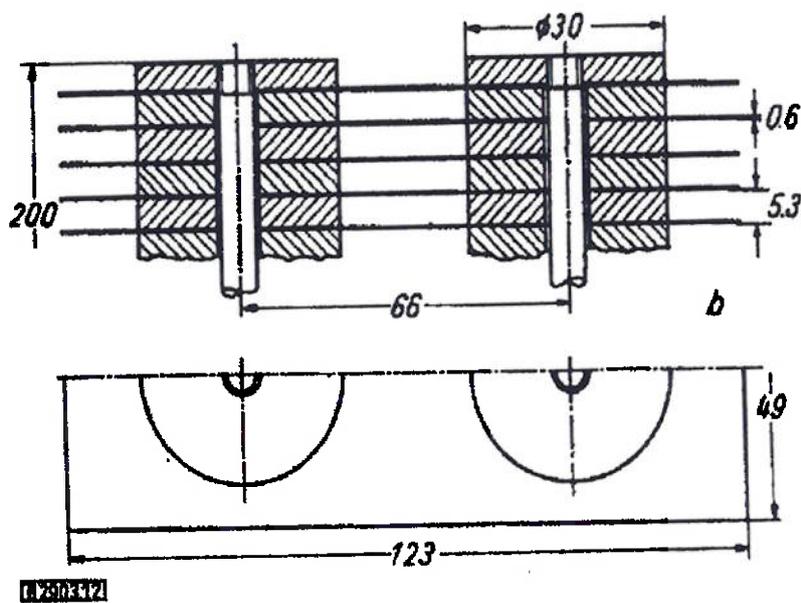


Figura 2.14 Trocador de calor com 2 tubos usado por Krückels [19].

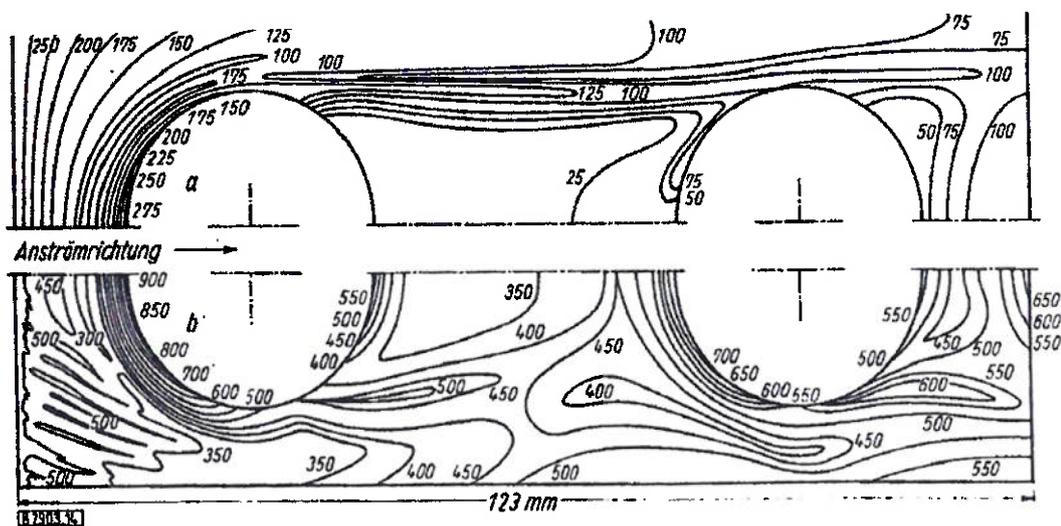


Figura 2.15 Distribuição do coeficiente de transferência de massa sobre o modelo de aleta.

$T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\rho = 1,15\text{ Kg/m}^3$, seção a com $u = 2\text{ m/s}$ e seção b com $u = 10\text{ m/s}$

A figura 2.14 é um desenho de um dos tipos de trocador de calor analisado por Krückels. Na figura 2.15 tem-se a distribuição do coeficiente de transferência de calor

sobre a superfície da aleta, obtido por Krückels e Kottke [19], ao usar a técnica de absorção.

Na tabela 2.25 têm-se um resumo dos principais trabalhos encontrados na literatura que utilizaram técnicas de absorção para determinar o coeficiente de transferência de massa.

Tabela 2.25, Relação dos principais trabalhos encontrados na literatura que utilizaram a técnica de absorção

Escoamentos	Referências
estudo da intensidade de turbulência sobre uma placa	1
estudo do ponto de estagnação em cilindro em escoamento cruzado	20 ; 18
estudo do ponto de estagnação em um disco em escoamento cruzados	10, 20
medição do coeficiente de transferência de massa em um disco em escoamento cruzado para diferentes intensidade de turbulências	22
determinação do coeficiente de transferência de massa sobre uma placa plana para diferentes espessuras com recirculação e separação de fluxos	23
determinação do coeficiente de transferência de massa sobre o escoamento em um cilindro com aletas quadradas e circulares	19, 25
estudo do escoamento em um feixe de tubos	2
estudo do escoamento e transferência de calor-massa nas passagens corrugadas	26
técnicas para determinar a transferência de massa local em qualquer superfície	24

Conclusões sobre os métodos de absorção.

O método desenvolvido por Kottke [10] é o mais simples dos métodos de absorção acoplados com a cor da reação, servindo para analisar superfícies complexas e distinguindo-se devido a alta resolução local na análise de superfícies de formas irregulares. A avaliação quantitativa é determinada por medições fotométricas através da refletividade da luz. Avaliações por processadores de imagens ou vídeo são adequados para distribuições complexas do coeficiente de transferência de massa. O método tem sido utilizado desde a análise de escoamento sobre placa plana até escoamento em superfícies complexas e passagens corrugadas. A desvantagem permanece na utilização de equipamentos mais sofisticados (em relação ao custo) mas em compensação tem como vantagem o pequeno tempo de ensaio, aproximadamente dois minutos para cada superfície.

2.5. MÉTODOS ELETROQUÍMICOS

O método eletroquímico tem sido discutido de forma detalhada no artigo escrito por Mizushina [11]. Nesse artigo inclui-se a teoria e as técnicas experimentais dos métodos, os resultados obtidos para um conjunto de situações incluindo convecção livre em placas horizontais e verticais, cilindros horizontais, esferas, assim como escoamento laminar e convecção forçada em escoamento internos a tubos, ao redor de um cilindro, etc. O artigo de Mizushina contém uma extensiva bibliografia sobre os métodos eletroquímicos.

Os métodos eletroquímicos são métodos experimentais que podem ser usados quando se pretende avaliar, com boa exatidão a transferência de massa em líquidos. Como o processo de transporte de íons é análogo ao processo de transferência de massa, pode-se usar os métodos eletroquímicos para medir os valores médios e valores locais dos coeficientes de transferência de massa e medir as tensões de cisalhamento na interface líquido e sólido do modelo. Apesar dos métodos eletroquímicos não serem aplicados para medir a transferência de calor diretamente, pode-se determinar de forma indireta, o valor médio e valores locais dos coeficientes de transferência de calor.

2.5.1 PROCESSO FÍSICO DO MÉTODO.

Segundo Eckert [1], ao inserir dois eletrodos dentro de uma célula eletrolítica ocorrerá a separação dos íons : os íons de carga positiva vão para o cátodo e os íons de carga negativa para o ânodo. Os íons movimentam-se repelindo ou atraindo um ou mais elétrons, de acordo com a diferença de potencial existente entre os eletrodos. A transferência de íons da solução eletrolítica para a superfície do eletrodo, (onde ocorre as mudanças físicas e químicas), pode ocorrer por :

-Convecção, por causa do escoamento do eletrolítico

- Migração, decorrentes de movimentos dos íons causados por campos elétricos
- Difusão, devido ao gradiente de concentração.

A transferência por convecção é desprezado no processo de redução ¹ porque não existe carga líquida na direção do eletrodo, não ocorrendo portanto depósito de materiais na superfície do eletrodo. Para situações onde esse fato não ocorre, Wilke apud Mizushina [11] mostra que o erro ao desprezar esse efeito está na faixa de 0,3 % do fluxo de massa depositado. Pode-se eliminar o efeito do movimento de íons por migração ao adicionar em excesso uma quantidade de eletrolito inerte na solução. Esse eletrolito não irá reagir com o eletrodo, contudo terá alta concentração e maior condutividade fazendo com que a concentração de íons de espécies reagentes nas proximidades do eletrodo seja desprezível. Nesse caso a corrente de migração, estimada por Mizushina [11], é de 1% da corrente total. Se o eletrolito de sustentação não estiver na solução, a corrente de migração passa a ser de 10 % da corrente total. Com essas considerações adota-se que o processo de transporte de íons é análogo ao processo de transferência de massa, sendo que a transferência de íons ocorre por difusão.

A taxa de transferência de massa das espécies reagentes é expressa por :

$$N_A = h_m (c_\infty - c_i) \quad (2.38)$$

A densidade de corrente no eletrodo é expressa por :

$$N_A = \frac{i}{A.n.e.F} \quad (2.39)$$

¹ganho de elétrons por um elemento químico.

Ao igualar as equações obtém-se :

$$h_m = \frac{i}{A \cdot n \cdot e \cdot F \cdot (c_\infty - c_i)} \quad (2.40)$$

onde A indica a área do modelo, o termo ne denota a valência do íon, F é a constante de Faraday, c é concentração do íon na solução eletrolítica e i indica a intensidade da corrente elétrica. A expressão acima possibilita determinar o coeficiente de transferência de massa em função da intensidade da corrente.

Na tabela 2.26 tem-se um resumo das principais substâncias eletrolíticas usadas no método eletroquímico. Dentre elas a solução de ferro cianeto [$K_3Fe(CN)_6$] com eletrolito inerte de hidróxido de sódio, ($NaOH$), é usada com maior frequência nos métodos eletroquímicos.

As reações dos íons nos eletrodo são descritos pelas seguintes equações :

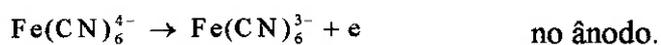
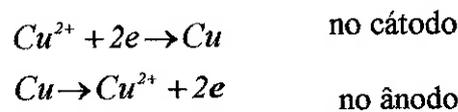


Tabela 2.26 Relação das substâncias utilizadas como eletrolito de sustentação

Eletrolito	Observação
a) Solução de sulfato de cobre ($CuSO_4$) com ácido sulfúrico (H_2SO_4)	Usado no processo de redução
b) Sistema Ferro cianeto-Ferro cianato $[K_3Fe(CN)_6 / K_4Fe(CN)_6]$	Frequentemente usados nos métodos eletroquímicos
c) $C_6H_4O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow C_6H_4(OH)_2$	Usada para reduzir a quinona no cátodo de prata.
d) $O_2 + 4e + 2H_2O \rightarrow 4OH^-$	Usado para reduzir o oxigênio no cátodo de prata, na solução de hidróxido de sódio.

A solução de sulfato de cobre, (a), na tabela acima, é usada quando se pretende reduzir os íons do metal como os do Cu^{2+} , depositando o cobre (*Cu*) no cátodo e na solução de ácido sulfúrico. As reações são descritas por :



As soluções (c) e (d) foram usadas por Lin apud Mizushina [11] para medir a transferência de massa em um escoamento anelar.

2.5.2 USO DO MÉTODO ELETROQUÍMICO NOS ESTUDOS DOS PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA.

Ao usar o método eletroquímico para avaliar o processo de transferência de massa deve-se:

- escolher um sistema eletrolítico no qual ocorra apenas um tipo de reação perto da superfície do eletrodo que será usado como modelo.

- definir um dos eletrodos como modelo no qual a transferência de massa irá ocorrer, e o outro como sendo a parede do canal por onde passará o escoamento.

- manter a área do eletrodo oposto maior do que a do modelo e medir de forma rápida a corrente no eletrodo.

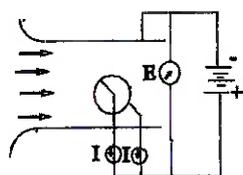


Figura 2.16 Esquema de aplicabilidade do método eletroquímico para estudar a transferência de calor em um cilindro. Eckert [1]

Como exemplo de aplicabilidade do método eletroquímico tem-se na figura 2.16 um esquema para medir o coeficiente de transferência de calor local ao redor da periferia de um cilindro exposto a um escoamento de eletrolito, normal ao eixo. O modelo neste caso é o anodo, e o canal da parede é o catodo. Uma faixa fina na superfície do cilindro está eletricamente isolada, podendo-se medir a corrente dentro dessa separadamente. Ao medir essa corrente o coeficiente de transferência de massa local h_m é obtido através da equação:

$$h_m = \frac{i}{A \cdot n e \cdot F \cdot (c_\infty - c_i)} \quad (2.41)$$

A concentração molar do íon é obtida através da mistura do fluido e a concentração do íon na superfície do modelo é considerada desprezível.

Ao medir a corrente limite de uma espécie específica de íons perto da superfície do modelo pode-se determinar o fluxo de massa. O intensidade da corrente limite em toda a superfície do eletrodo fornece o valor médio do coeficiente de transferência de massa. Por outro lado, vários pontos do eletrodo que esteja eletricamente isolados, possibilitam determinar os valores locais do coeficiente de transferência de massa. O detalhe de um

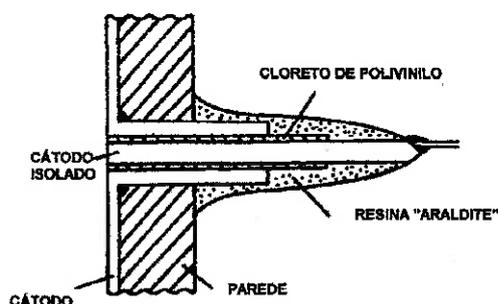


Figura 2.17 Detalhe de isolamento do cátodo
ponto isolado do eletrodo fornecido por Mizushina [11] está representado na figura 2.17.

Na figura 2.18 está representado o limite da corrente em função do potencial aplicado no cátodo.

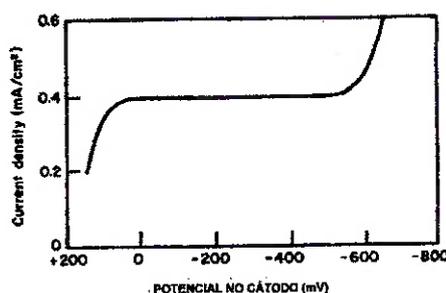


Figura 2.18 Variação do limite de corrente em função do potencial do cátodo.

Conclusões sobre o método eletroquímico.

Tendo em vista a existência de diversos instrumentos para medir pequenas variações de corrente elétrica, constata-se que a exatidão das medições da transferência de massa está na faixa de 2 a 3%. Algumas precauções devem ser tomadas na obtenção dos resultados. Dentre elas deve-se checar freqüentemente a superfície do modelo a fim de mante-lo freqüentemente limpo. Por outro lado, uma camada com alta resistência elétrica será depositado na superfície do modelo.

Existem algumas limitações ao usar o método eletroquímico. Entre elas tem-se:

- o método eletroquímico está limitado a líquidos, estando os dados de transferência de massa limitados para altos números de Schmidt.
- apenas certos tipos de misturas de líquidos podem ser usados.
- não é aconselhável usar o método para altas velocidades dos quais a resistência no cátodo torna-se significativa, comparada com o decréscimo da resistência de difusão.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE LOCAL DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA COM USO DA TÉCNICA DE ABSORÇÃO

A metodologia de avaliação é um procedimento para determinar a distribuição do coeficiente de transferência de massa sobre a superfície, usando um sistema de tratamento de imagem (STI). A técnica experimental escolhida para o desenvolvimento dos testes é o processo de absorção da amônia que, pôr intermédio de reações químicas, forma um produto colorido. Para utilizar essa técnica foi desenvolvido um revestimento gelatinoso (Gel), a base de sulfato de manganês , que tem a característica de cobrir a superfície de ensaio formando uma camada uniforme , estável e absorvente . Uma outra novidade desse método é o uso de “*scanner*” para avaliar a distribuição da cor formada após o processo de absorção.

3.1 EQUACIONAMENTO.

A transferência de massa para um escoamento isotérmico é representada pela equação

$$m_A = h_m \cdot \Delta\rho_A \quad (3.1)$$

Ao integrar a equação acima para o intervalo de ensaio t_0 a t_v , têm-se como resultado:

$$\int_{t_0}^{t_v} m_A dt = h_m \int_{t_0}^{t_v} \Delta\rho_A dt \quad (3.2)$$

O termo do lado esquerdo dessa equação indica a massa transferida pela superfície tendo, como dimensão massa pôr unidade de superfície . Entretanto, como diversos trabalhos analisados na revisão da literatura usam o termo b para representar a densidade de massa formada na superfície, achou-se conveniente usar esse termo também neste trabalho. Ao reescrever a expressão acima tem-se :

$$b = \int_{t_0}^{t_v} h_m \Delta \rho_A dt \quad (3.3)$$

que representa a massa transferida para a superfície . Nos métodos de absorção, o processo de transferência de massa é governado pela camada limite, ou seja, a concentração do lado do gás. Esse é o caso quando a massa específica do gás no escoamento tem um valor constante, ou seja, na superfície ρ_{A_0} deva ser igual a zero.

Sob esse pressuposto , a equação para determinar o coeficiente de transferência de massa será :

$$h_m = \frac{b}{\int_{t_0}^{t_v} \rho_{A_0}(t) dt} \quad (3.4)$$

O coeficiente de transferência de massa h_m é proporcional à quantidade de massa absorvida pela superfície. A integral na equação acima poderá ser resolvida dependendo das condições do ensaio. Para as situações onde a massa específica do gás seja constante no escoamento, pode-se reescrever a equação acima da seguinte forma :

$$h_m = \frac{b}{\rho_{A_0} \cdot (t_v - t_0)} \quad (3.5)$$

onde a densidade de massa b pode ser determinada por intermédio de métodos experimentais.

3.2 PROCESSO FÍSICO E QUÍMICO DA TÉCNICA DE ABSORÇÃO

As características físico-químico da técnica de absorção estão relacionadas ao gás que irá reagir com a solução que cobre a superfície. O produto dessa reação dependerá do tipo de gás utilizado e das características de cada reagente.

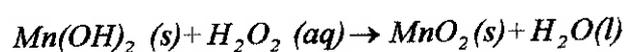
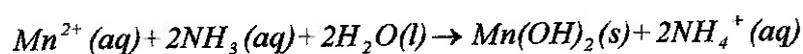
Krückels [4, 9] forneceu uma comparação dos principais gases utilizados nos processos de absorção. Conforme pode ser observado pela tabela 3.1, a amônia apresenta um dos maiores coeficientes de solubilidade, além de ter o número de Lewis próximo de um. Essas características são favoráveis para a utilização da analogia entre a transferência de calor e de massa.

Tabela 3.1. Características dos gases usados na técnica de absorção.

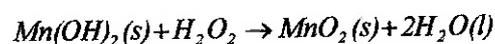
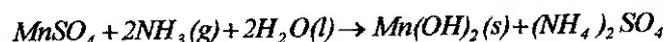
Gás	massa molecular	Coefficiente de solubilidade a 25°C	Lewis a/D
NH_3	17.03	1.72	0.936
SO_2	64.06	0.0715	1.515
CO_2	44.01	0.00101	1.362
H_2S	34.08	0.00303	1.597
CH_3NH_2	31.06	2.98	1.268

Uma vez escolhido o gás a ser usado nos experimentos deve-se definir os componentes que não sejam inertes a esse tipo de gás. Krückels e Kottke [19] usaram uma solução aquosa de cloreto de manganês para a obtenção da reação iônica entre íons manganês e amônia formando óxido de manganês, um composto sólido e estável que possui uma cor castanha bem definida. Contudo neste trabalho emprega-se uma solução de sulfato de manganês pois constatou-se que para a obtenção da reação iônica entre a amônia pode-

se usar tanto o sulfato tão bem como cloreto de manganês, além do fato de que foi mais fácil obter a substância sulfato de manganês. Como reagente recomenda-se o uso da amônia, substância usada na maioria dos métodos de absorção. Ao provocar uma reação química entre o sulfato de manganês e amônia pode-se obter formação do óxido de manganês, substância de cor castanha. A formação do óxido de manganês pode ser representada pela equação iônica abaixo.



Nesta equação o íons manganês irá reagir com a amônia na presença da água, formando hidróxido de manganês. O hidróxido de manganês na presença do peróxido de hidrogênio, agente oxidante, permite a liberação do hidrogênio para a formação do óxido de manganês. Ao reescrever a equação iônica acima em termos dos principais produtos usados para constituir o gel, ou seja no meio gelatinoso, tem-se a equação química abaixo.



Nestas equações tem-se que cada mol de dióxido de manganês formado, (MnO_2), consome 2 moles de amônia (NH_3).

3.3 REVESTIMENTO GELATINOSO (GEL)

Para que ocorra o processo de absorção sobre a superfície deve-se cobri-la com uma camada de material absorvente, inerte a superfície mas que seja reativa ao gás existente no escoamento, que denominamos gel. O gel é uma solução aquosa a base de sulfato de manganês que tem por função, ao reagir com a amônia, formar uma camada de dióxido de manganês. Na formulação do gel é aconselhável acrescentar sulfato de manganês em excesso garantindo-se assim que toda a massa de amônia transferida para a superfície seja absorvida. O agar é um composto que ao ser dissolvido em água torna-se transparente tendo por função alterar a viscosidade do gel sem mudar as características químicas da solução. Uma solução mais viscosa permite obter uma camada de material uniforme diretamente sobre a superfície do modelo, dispensando muitas vezes a necessidade de cobrir a superfície com uma lâmina de papel. Ao escolher o uso de uma solução aquosa de sulfato de manganês, sem a introdução do agar, deve-se aplicá-la sobre a superfície de uma lâmina de papel.

Preparação do gel

Em um frasco de 150 ml aquece-se 0.5 gramas de agar-agar junto com 80 ml de água destilada até que a temperatura atinja 60 °C . Após dissolver o agar-agar faz-se uma filtração para eliminar as impurezas da mistura. Deve-se então adicionar a esta solução 5 gramas de sulfato de manganês e 0.05 gramas de sds, dodecil sulfato de sódio, que é um tenso ativo que tem pôr função aumentar a tensão superficial . A mistura deve ser reaquecida pôr volta de 10 minutos, a temperatura de 40°C, onde deve-se completar com água até formar 100 ml do composto. Essa substância ficará estável se for conservada na ausência de ar. Antes do experimento pode-se adicionar 5 ml de peróxido de hidrogênio dissolvidos a 2 volumes. Essa nova substância deve ser usada no máximo em três dias pois

o peróxido de hidrogênio irá se decompor aos poucos.

3.4 APARATO EXPERIMENTAL

A instalação experimental é composta por um reservatório para amônia, um venturi ligado a uma câmara de distribuição e uma bomba de vácuo, instalado no Departamento de Química Experimental no Instituto de Química da Universidade de São Paulo.

Para fins do presente trabalho precisava-se de um sistema de sucção para provocar o escoamento dentro do venturi. Como no Departamento de Química Experimental, existia uma bomba de vácuo, projetou-se um venturi e uma câmara de distribuição para acoplar nesse sistema criando um escoamento com baixa velocidade em um duto de sistema aberto. A foto do aparato experimental está representado na figura 3.1.

Nesse aparato experimental captura-se o ar do interior do laboratório e antes da descarga, faz-se uma filtração usando uma solução de nitrato de prata para absorver a amônia em excesso, evitando assim contaminar a bomba de vácuo e o Laboratório.

O esquema geral da instalação, contém as seguintes partes:

- Venturi
- Câmara de distribuição
- Reservatório de amônia
- Bomba de Vácuo

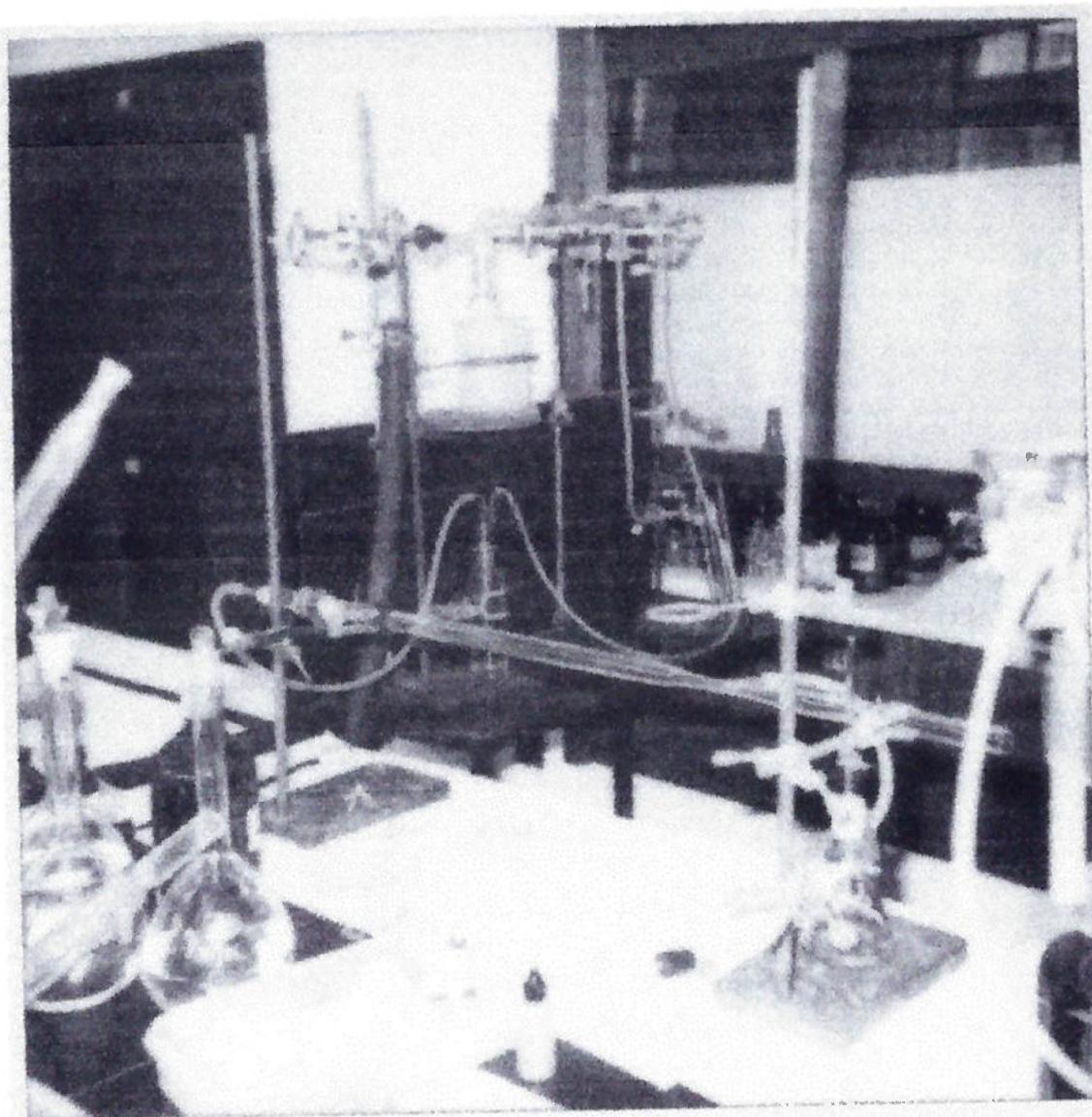


Figura 3.1 Aparato experimental usado para a obtenção das camadas coloridas

Venturi

O venturi foi fabricado utilizando vidro com espessura de 2 mm, com superfície lisa. O bocal de entrada possui diâmetro interno de 20 mm e trecho reto de 200 mm. Após esse trecho, existe uma contração de 4:1, outro trecho reto de 50 mm com diâmetro de 6 mm e, uma expansão de 1:4, e um trecho reto de 500 mm. Na extremidade dessa seção está

fixado um vidro sinterizado de baixa gramatura, que servirá para homogenizar o escoamento e impedir que impurezas do ar passem para a lamina de ensaio. O venturi tem por função promover um perfil de concentração uniforme na entrada da câmara de distribuição.

Câmara de distribuição

A lâmina de ensaio foi fixada na câmara de distribuição. Na entrada da câmara tem-se outra placa de vidro sinterizado, servindo de apoio para a lâmina. A seção interna possui diâmetro interno de 20 mm, com trechos retos.

Reservatório de amônia

O reservatório de amônia é constituído de um erlenmeyer com capacidade para 200 ml. No bocal desse frasco tem-se uma rolha para vedar o gás contido no frasco. Um tubo com uma torneira de vidro está fixado no centro da rolha para permitir o controle da entrada de ar para o frasco. A saída de gás é controlada por uma pinça presa a uma mangueira flexível que une a saída do frasco a seção de contração do venturi. O uso desse sistema simples de baixo custo justifica-se pois para esse aparato experimental a massa de amônia injetada no venturi não será usada no cálculo da massa absorvida. Ao injetar maior ou menor quantidade de amônia obtém-se, sobre a lamina de ensaio, intensidade de cores distintas.

Bomba de vácuo

A bomba de vácuo produz a diferença de pressão necessária para que ocorra o escoamento, ao ligar-se a mangueira de sucção da bomba na saída do aparato experimental. Ao ajustar as três válvulas de vidro existentes no conjunto da bomba de vácuo, pode-se obter diferentes valores da velocidade do escoamento. A foto da bomba de vácuo é mostrada na figura 3.2.

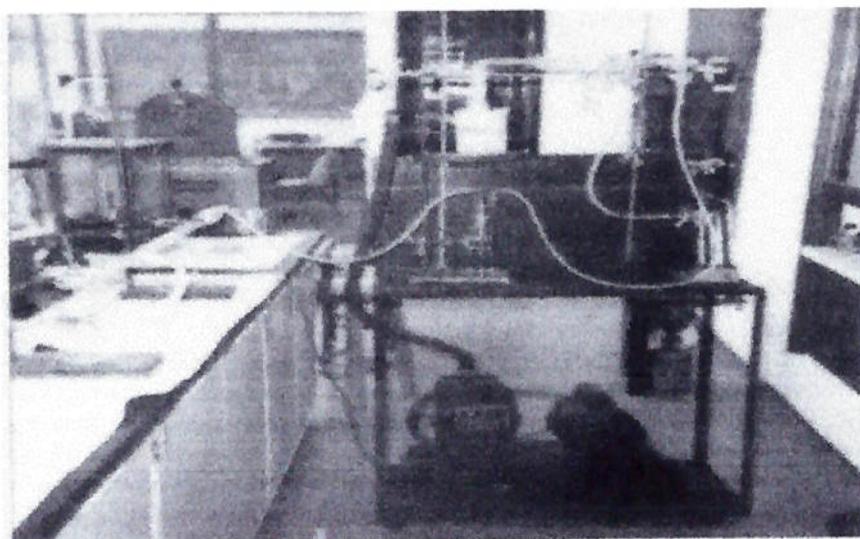


Figura 3.2 Bomba de vácuo

3.5 FORMAÇÃO DA CAMADA DE DIÓXIDO DE MANGANÊS

Após o processo de absorção, obtém-se uma distribuição do dióxido de manganês sobre a superfície da lâmina de ensaio. Quanto maior for a intensidade da cor formada, maior será a quantidade de amônia absorvida pela superfície, resultando numa maior transferência de massa, ou seja, a transformação do ion manganês (Mn^{2+}) contido no sulfato de manganês de coloração branca, para o ion manganês (Mn^{4+}) contido no óxido de coloração castanha. A figura 3.3 contém as principais amostras obtidas pelo processo de absorção que serão utilizadas para análise química.

Na formulação do gel acrescenta-se o sulfato de manganês em excesso para resultar, após a reação, uma porcentagem de *Mn* não transformado. Essa porcentagem pode ser retirada da superfície pôr um processo de lavagem, servindo de parâmetro para determinar a quantidade de manganês que reagiu. Utilizando-se essa hipótese, desenvolveu-se um procedimento que permite avaliar a massa absorvida pela superfície através de análise química .

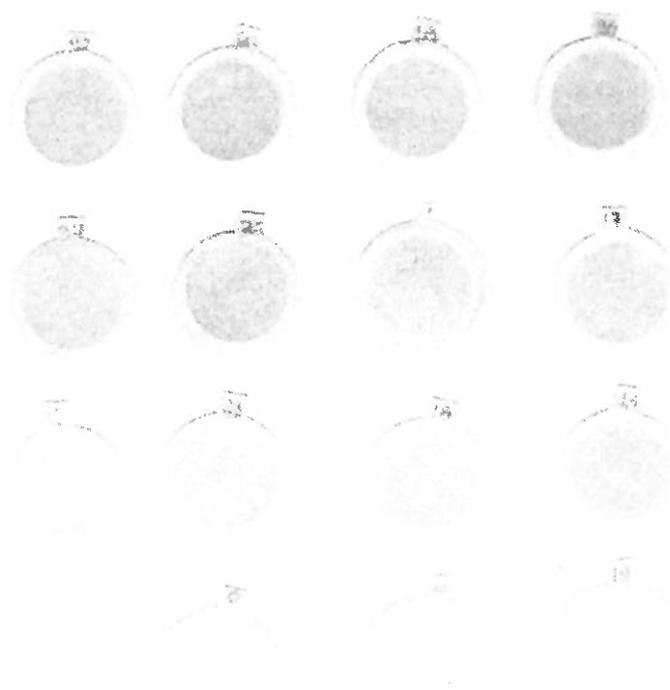


Figura 3.3 Principais amostras obtidas na câmara de distribuição

3.6 PROCEDIMENTO PARA DETERMINAR A MASSA DE AMÔNIA ABSORVIDA, USANDO ANÁLISE QUÍMICA.

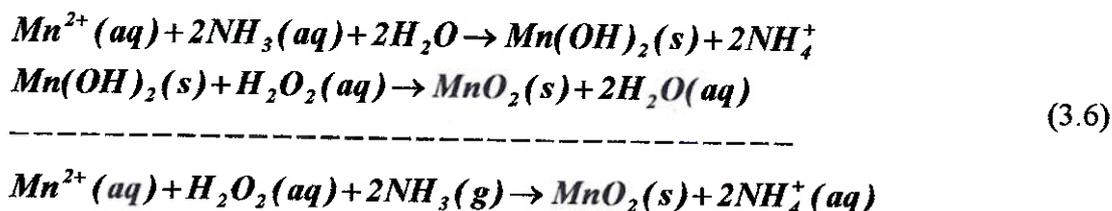
Avaliar através da análise química a quantidade de massa absorvida consiste em determinar a porcentagem de manganês que não reagiu e através de relações estequiométricas obter a massa absorvida. Após o processo de absorção, cada amostra é colocada dentro de um frasco tampado junto com 15 ml de água destilada. Para desprender da superfície o *Mn* que não reagiu, introduz-se esse frasco dentro de um agitador magnético.

- a) A solução de íon manganês é depositada dentro de um erlenmeyer de 250 ml.
- b) 75 ml de solução de persulfato de potássio a 20 g/l ($K_2S_2O_8$) é adicionado.
- c) 15 ml de ácido sulfúrico é adicionado.
- d) 15 ml de nitrato de prata a 10 g/l ($AgNO_3$) é adicionado.

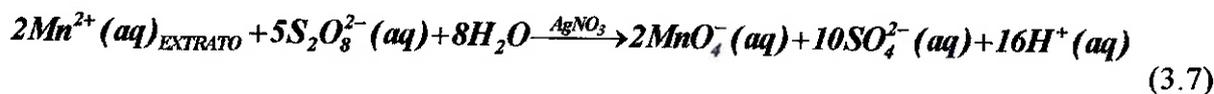
Essa mistura deve ser aquecida até 80 °C, até que ocorra a formação completa do permanganato. Uma vez obtido as soluções de permanganato a partir do íon manganês, inicia-se o processo de titulação usando uma solução de oxalato de amônio com concentração conhecida, por volta de 1,6092 g/l. É recomendável titular a solução de permanganato em uma solução de banho de gelo, trabalhando assim a uma temperatura inferior ao do ambiente.

3.6.1 ANÁLISE DAS EQUAÇÕES QUÍMICAS

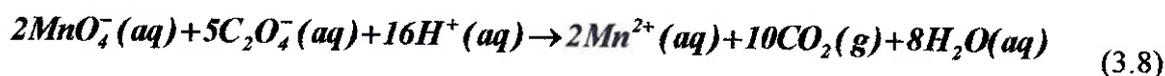
O processo de absorção entre os componentes do gel e a amônia é descrita pela reação química 3.6.



Após o processo de absorção, deve-se retirar a porcentagem de manganês que não reagiu e submete-la a um tratamento químico. As reações químicas, para a solução que estava no extrato serão:



Ao realizar a titulação na solução do extrato ocorrerá a seguinte reação:



Equacionamento

Ao titular a solução do extrato, pode-se definir que no ponto de equivalência, momento em que ocorre a transformação da cor violeta para incolor, não há excesso de MnO_4^- nem de $C_2O_4^{2-}$. Assim, considera-se que a correlação entre os números de mol será:

$$n(MnO_4^-) = 2,5 \cdot n(C_2O_4^{2-})
 \tag{3.9}$$

A concentração de uma substância pode ser representada como a relação entre o número de mol pelo volume. Para o oxalato temos:

$$C_{(C_2O_4)} = \frac{n_{(C_2O_4)}}{V} \Rightarrow n_{(C_2O_4)} = C.V \quad (3.10)$$

A concentração, C , da solução de oxalato é determinada ao preparar a solução para a titulação, e o volume, V , representa o volume de oxalato gasto ao titular a solução do extrato.

Cálculos iniciais

A concentração da solução de oxalato é de $C=1,692 \text{ g.l}^{-1}$. A massa molecular para essa substância vale : $M.M=124 \text{ g.mol}^{-1}$. Pode-se representar a concentração do oxalato na base molar ao dividir a concentração da substâncias pelo valor da massa molecular. Na base molar , a concentração do oxalato será de $C= 1,36.10^{-2} \text{ mol.l}^{-1}$.

As seguintes equações são válidas na base molar:

$$n_{(C_2O_4)} = C_{(C_2O_4)} \cdot V_{(C_2O_4)} \quad (3.11)$$

$$n_{(MnO_4)} = \frac{5}{2} n_{(C_2O_4)} \quad (3.12)$$

$$n_{(Mn^{2+})EXT} = n_{(MnO_4)} \quad (3.13)$$

onde os volumes devem estar em litros e a concentração em mol.l^{-1} .

Para reações sem amônia, considera-se que o número de moles de manganês inicial sobre a superfície será igual ao número de moles do manganês da solução do extrato. Para reações com amônia considera-se que o número de moles de manganês que foi usado para absorver a amônia será igual ao número de moles de manganês inicial menos o número de moles da solução do extrato.

Pelas equações estequiométricas sabe-se que o número de moles de amônia que reagiu será

duas vezes o número de moles de manganês usado para absorver a amônia. A massa de amônia absorvida pode ser calculada como sendo o produto entre o número de moles da amônia pela massa molecular.

3.7 SISTEMA DE TRATAMENTO DE IMAGEM (STI)

A análise da intensidade de cinzas da amostra foi obtida por intermédio de um sistema de tratamento de imagem. Foi capturado a amostra por intermédio de um “scanner” Color Page - CS marca Genius e transferido essa imagem para o “software” *Photo-Paint*, neste “software” fez-se o mapeamento da amostra analisando a intensidade de cinzas global usando a função “efeito pixel”. A vantagem em usar esse sistema de tratamento é o baixo custo, possibilidade de armazenar a amostra em um banco de dados, além de poder analisar amostras do tamanho de uma folha de papel formato *A4*, porém recomenda-se o desenvolvimento de um software específico para a análise de tratamento de imagem, esse software pode ser desenvolvido na linguagem “*Visual Basic*”, e pelo desenvolvimento de um novo *software* pode-se reduzir o número de incertezas associadas as medições bem como obter diretamente o coeficiente local de transferência de calor a partir da intensidade de cinzas analisada. Para comparar os resultados experimentais obtidos pelo STI, utilizou-se um espectro fotômetro portátil modelo *X-Rite 968* para avaliar a intensidade da cor das mesmas amostras analisadas pelo STI. O espectro fotômetro compara e fornece a diferença entre a cor da amostragem com um padrão de 24 cores pré fixados. Pode-se escolher uma abertura para leitura da cor usando um diâmetro de 4, 8 e 24 mm. O resultado das amostras analisadas são a média aritmética de três leituras realizadas para cada amostras. As desvantagem do espectro fotômetro utilizado são, dificuldade em avaliar a intensidade de cor global de amostras maiores do que 24 mm, custo do equipamento, por exemplo o modelo *X-Rite 968* esta estimado em 13 mil dólares.

CAPÍTULO 4

4 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo desse capítulo é descrever a metodologia que foi utilizada para medir e analisar os resultados obtidos através da análise experimental. O método permite medir o coeficiente de transferência de calor usando experimentos de transferência de massa ao aplicar a analogia entre esses dois processos. O coeficiente de transferência de massa pode ser medido de forma indireta através do desenvolvimento da curva de calibração, obtida ao relacionar a intensidade de cinza pela densidade de massa absorvida em amostras convenientemente produzidas. Para obter as amostras injetou-se amônia em diferentes intervalos de tempo dentro de uma câmara de distribuição. Após o processo de absorção de amônia, obteve-se sobre a superfície da amostra uma mudança de cor de branco para castanho. A cor formada foi medida em termos de intensidade de cinzas ao usar um sistema de tratamento de imagem e um espectro fotômetro. A massa de amônia absorvida foi determinada ao realizar a análise química nas amostras. A análise química permitiu medir a massa de manganês existente sobre a superfície da lamina, nas amostras sem amônia e com amônia. Por intermédio de relações estequiométricas determinou-se a massa de amônia que foi absorvida pela lâmina de papel. Os resultados experimentais foram submetidos ao tratamento estatístico através da técnica de Thompson [65], e fez-se uma análise de incertezas para avaliar as incertezas associadas na parte experimental.

4.1 DETERMINAÇÃO DA MASSA DE AMÔNIA ABSORVIDA

A massa de amônia absorvida pela superfície foi obtida a partir do desenvolvimento da equação 4.1

$$m_A = 0,6855 \cdot C \cdot \left(\sum \frac{V_i}{n} - V_e \right) \quad (4.1)$$

onde m_A é o valor da massa de amônia expressa em miligramas [mg], C é a concentração de oxalato expresso em gramas por litros [g/l] e V_i e V_e indicam os valores de oxalatos gastos para analisar a massa inicial e residual de manganês extraídas da lâmina de ensaio, em mililitros [ml]. A constante 0,6855 é válida quando se trabalha com essas unidades.

A massa de amônia está relacionada de forma direta com a intensidade de cinza; quanto maior for a massa deve-se obter uma cor mais escura. Para utilizar essa equação desenvolveu-se em cada série de ensaio:

- ▶ uma solução de 1000 ml de oxalato com concentração conhecida.
- ▶ análise de 10 amostras para determinar a massa inicial de manganês.
- ▶ análise de várias amostras obtidas pelo processo de absorção.

Análise da massa inicial de manganês sobre a lâmina de ensaio.

A massa inicial do íon manganês sobre a superfície da lâmina de ensaio foi usada para determinar a massa de amônia absorvida. Esse parâmetro foi medido para saber quanto de massa de manganês se tinha inicialmente sobre a amostra. Ao comparar os diversos valores obtidos na análise experimental verificou-se que esses valores eram semelhantes, tornando-se viável a padronização dos ensaios para obter a massa inicial do íon manganês. A massa inicial de Mn pode ser determinada diretamente através de

diversas técnicas, dentre elas a técnica de pesagem. Esta técnica consiste em depositar, com um conta-gotas, uma quantidade de massa conhecida sobre a lâmina; no entanto não se pode garantir que a camada formada esteja uniforme sobre a lâmina. Outro procedimento que pode ser usado é de pesar a lâmina impregnada com o gel antes do experimento. Nesse caso, deve-se medir e avaliar a massa da substância perdida devido à evaporação do gel.

Nesta metodologia, preferiu-se utilizar medições indiretas como procedimento de trabalho, ou seja, realizou-se vários ensaios na câmara de distribuição sem usar a amônia, e após esses ensaios, quantificou-se a massa de manganês contida na superfície da lâmina. Testes realizados variando-se o tempo de ensaio permitiu observar que pode ocorrer perda de massa da lâmina para atmosfera, devido a depressão causada pela bomba de vácuo. Para contornar esse efeito deve-se realizar experimentos a baixa velocidade e padronizar o tempo de ensaio. Neste trabalho padronizou-se o tempo de ensaio para 60 s. Com esse valor foi possível injetar amônia até 70% do tempo de ensaio, tempo suficiente para o escoamento, contendo amônia, atravessar toda a superfície do papel obtendo-se assim, para cada amostra, uma intensidade de cinzas distinta. Um outro aspecto a ser considerado é a influencia que a diluição do gel pode causar sobre os valores da massa inicial de manganês. Notou-se que em diversos experimentos, ao usar diferentes concentrações do gel, devido a adição aleatória de agentes oxidantes, obteve-se diferentes valores da massa inicial do íon manganês. Esse procedimento pode ser usado quando se pretende determinar a massa de manganês para diferentes concentrações do gel. No entanto, quando um dos objetivos da análise experimental for a realização de uma série de ensaios para relacionar a massa absorvida com a intensidade de cinza, é conveniente controlar a diluição do gel com o agente oxidante. Recomenda-se para obtenção do composto, usar uma porcentagem fixa do gel e variar a diluição da solução oxidante, ou seja, diluir por

exemplo, 70% de gel com 30% de solução de agente oxidante, fazendo com que a soma do peróxido de hidrogênio com a água resulte em 30% de solução. Esse procedimento permite obter várias soluções de gel com diferentes concentrações de agente oxidante, mas com concentrações semelhantes de íon manganês. A massa inicial de manganês sobre a superfície da lâmina de ensaio foi determinada pela equação abaixo, obtida a partir de relações estequiométricas

$$m_M = 1,11.C.V \quad (2.2)$$

Nesta expressão, m_M representa a massa inicial de manganês expressa em miligramas [mg], C é a concentração da solução de oxalato usada na titulação, em gramas por litros [g/l] e V é o volume de oxalato gasto para titular a solução do extrato, em mililitros [ml].

Na tabela 4.1 têm-se os principais valores da massa inicial de manganês, obtidos na análise experimental. Esses resultados foram submetidos a um tratamento estatístico através da técnica de Thompson [65].

Tabela 4.1, Massa inicial do íon manganês sobre a superfície da lâmina.

Tipos de gel	Massa inicial de manganês (mg)	Índice de precisão	Concentração de oxalato (g/l)
Gel A	57.96	0.96	1.6092
Gel B	32.65	0.668	1.6526
Gel C	17.36	1.148	1.5881

O gel A foi aplicado sobre a superfície da lâmina de ensaio em sua forma natural,

ou seja, sem a adição de agentes oxidantes. O gel B foi diluído na proporção de 85 ml de gel misturados com 25 ml de peróxido de hidrogênio. O gel C foi diluído na proporção de 30 ml de gel com 20 ml de peróxido de hidrogênio. Foram usados, para calcular as massas iniciais de manganês, os valores médios do volume de oxalato gastos para titular as diversas lâminas de ensaio sem submetê-las ao processo de absorção da amônia. Os índices de precisão referem-se aos volumes médios de oxalatos que foram usados para calcular a massa de amônia absorvida. As incertezas associadas para medir a massa inicial do íon manganês está na faixa de 6%.

Análise da área da lâmina de ensaio

Em uma amostra pode-se ter pelo menos três áreas distintas, denominadas:

- A_{ia} área interior do papel, corresponde a secção que foi atravessada pelo escoamento, onde ocorre a absorção direta da amônia.
- A_{cc} área da coroa circular, é a área que fica apoiada sobre o anel o-ring.
- A_{e} área externa, é a área situada externamente ao anel o-ring.

Como a extração do manganês residual corresponde a toda lâmina, apesar de que nem toda a área da lâmina ficou coberta com a camada de dióxido de manganês, fez-se uma avaliação da porcentagem da área que realmente absorveu a amônia descontando as áreas que não sofreram absorção. Esse procedimento permitiu minimizar as incertezas associadas ao experimento. A estimativa foi feita ao considerar que em uma amostra branca com uma área de $4,16 \text{ cm}^2$, gastou-se, em média, um volume de oxalato de $9,85 \text{ ml}$ na titulação. Ao dividir a área da lâmina pelo valor do volume de oxalato gasto na titulação obteve-se uma proporção de $2,37 \text{ [ml / cm}^2\text{]}$. Para saber qual foi o volume gasto em uma amostra multiplicou-se o valor dessa proporção pela área correspondente da amostra que

não sofreu o processo de absorção.

Na tabela 4.2 tem-se um resumo dessas áreas com os respectivos volume de oxalato.

Tabela 4.2 Análise da área da lâmina de ensaio.

Amostras	d.ia	d.cc	A .ia	A t	A cc	A . r	A . ic	A .b	V.t	V. ab	V. ia	r =ml/cm ²
90	1,80	2,30	2,54	2,92	0,20	0,18	2,73	0,18	6,10	0,48	5,62	2,06
13	1,90	2,20	2,83	3,08	0,07	0,18	2,88	0,21	7,60	0,53	7,07	2,46
18	1,80	2,20	2,54	2,85	0,13	0,18	2,54	0,31	8,40	0,79	7,61	2,99
20	1,80	2,30	2,54	2,92	0,20	0,18	2,54	0,38	9,50	0,97	8,53	3,35
19	1,80	2,30	2,54	2,99	0,20	0,25	2,54	0,45	9,00	1,15	7,85	3,09
15	1,80	2,20	2,54	2,89	0,13	0,23	2,54	0,35	8,80	0,90	7,90	3,11
91	1,85	2,30	2,69	3,05	0,16	0,20	2,83	0,21	7,05	0,54	6,51	2,30
90	1,80	2,30	2,54		0,20	0,20	2,76	0,18	6,10	0,46	5,64	2,04

Os valores relacionados à área de intensidade de cinza, A_{ic} , representam uma estimativa da área da amostra que foi escurecida pela absorção da amônia, e os valores da área branca, A_b , indicam a área da amostra que não absorveu amônia. Os volumes, V_{ab} , e V_{ia} , são estimativas dos volumes médios gastos para analisar as áreas que não absorveram e das que absorveram amônia. O valor de r é a proporção entre o volume gasto para analisar as áreas internas da amostragem, V_{ia} , pela área correspondente, A_{ia} . O volume de oxalato gasto para titular a lâmina de ensaio corresponde a massa de manganês que foi extraída da superfície. Contudo a distribuição desse manganês sobre a superfície não é uniforme, pois nas áreas onde houver absorção existirá uma massa de manganês, menor em relação as áreas onde a absorção não foi tão completa. Como a densidade de massa absorvida é a relação entre a massa de amônia absorvida dividida pela área correspondente, e esse termo é função do volume de oxalato gasto na titulação, deve-se calcular a porcentagem do volume que irá corresponder a essa área. Ao obter o volume de oxalato gasto para titular a solução de manganês contida no extrato, referente a área interna da amostra, obtém-se os

dados necessários para desenvolver a curva de calibração.

4.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO

O objetivo em determinar a curva de calibração é obter a uma relação funcional entre a densidade de massa absorvida pela intensidade de cinza da amostra formada. Essa relação deve permitir analisar escoamento, usados experimentos de transferência de massa, para determinar o coeficiente de transferência de calor. Para verificar o comportamento da curva de calibração, desenvolvida nesta dissertação será analisada a curva de calibração desenvolvida por Krückels.

Curva de calibração desenvolvida por Krückels.

Os resultados obtidos por Krückels [9], estão apresentados pela tabela 4.3

Tabela 4.3, Resultados experimentais obtidos por Krückels [9].

Amostras	τ	b
1	0,860	0,110
2	0,821	0,160
3	0,697	0,310
4	0,523	0,472
5	0,432	0,659
6	0,424	0,659
7	0,269	1,030
8	0,250	1,020
9	0,201	1,400

Os termos τ e b indicam o grau de transmissão da luz e a densidade de massa absorvida. Ao reduzir esses valores em uma planilha de calculo eletrônico foi possível obter

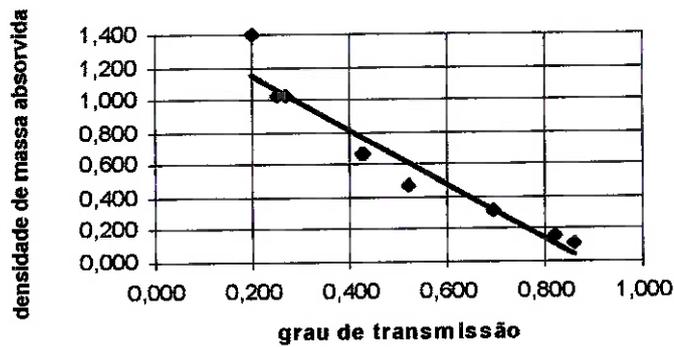


Figura 4.1 Curva de calibração obtida por Krückels

a reta da figura 4.1 através do método dos mínimos quadrados. Ao analisar esse gráfico observa-se que Krückels obteve uma relação diretamente proporcional entre a densidade de massa absorvida e o grau de transmissão da luz. Esses valores permitem medir o grau de transmissão médio entre $0,20 < \tau < 0,80$ com 5% de dispersão.

4.2.1 Curva de calibração obtida por intermédio de um Espectro-fotômetro

Para analisar a intensidade da cor formada usou-se nessa dissertação dois sistemas distintos de análise de imagem, quais sejam, um espectro-fotômetro e um sistema de tratamento de imagem. O espectro-fotômetro permitiu medir a cor das amostras em relação a um padrão de cor pré estabelecido.

Na tabela 4.4 têm-se as principais amostras usadas na curva de calibração.

Tabela 4.4, Resultados experimentais obtidos usando um espectro fotômetro.

Amostras	C_E	b_E
20	0,96	0,562
19	0,93	0,853
15	0,86	0,833
18	0,71	0,955
13	0,51	1,051
90	0,00	1,655
91	0,26	1,282

A intensidade da cor de cada amostra na tabela 4.4 representa uma conversão da média aritmética de três leituras realizadas pelo espectro fotômetro. Essa conversão permitiu expressar a leitura do espectro fotômetro para um intervalo de 0 a 100%. Foi possível fazer essa conversão ao introduzir os valores obtidos pelo espectro fotômetro na expressão abaixo.

$$C_E = 1 - \frac{lesp}{205} \quad (4.3)$$

O termo C_E indica a intensidade de cor adaptada para a escala de cinzas e o termo $lesp$ é o valor da leitura obtido pelo espectro fotômetro. Nesta equação usou-se o valor de 205, sendo que esse número é o maior valor da leitura do espectro fotômetro obtido para o conjunto de amostras analisados. Ao reduzir os dados da tabela 4.4 em uma planilha eletrônica obteve-se o gráfico da figura 4.2.

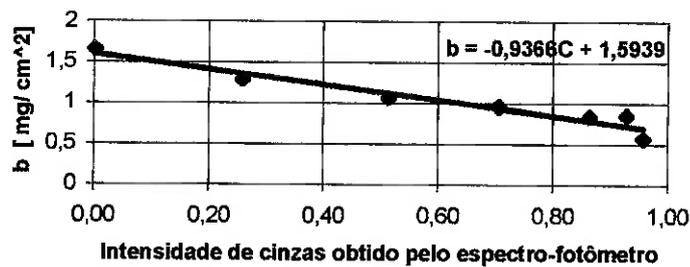


Figura 4.2 Curva de calibração usando o espectro-fotômetro

4.2.2 Curva de Calibração usando um Sistema de Tratamento de Imagem (STI)

Ao usar o STI foi possível analisar as diversas amostras obtidas na análise experimental

Tabela 4.5, Resultados experimentais usando um STI

Amostras	%C	b (STI)
20	1,00	0,562
19	0,99	0,853
15	0,92	0,833
18	0,90	0,955
13	0,85	1,051
90	0,64	1,655
91	0,69	1,282

Na tabela 4.5 os termos %C e b indicam a intensidade de cinzas e a densidade de massa absorvida. Obteve-se gráfico da figura 4.3 ao relacionar essas duas grandezas.

Os valores de %C foram submetidos ao tratamento estatístico através da técnica de Thompson [65]. As incertezas associadas a esses experimentos são de 5% para os valores da densidade de massa absorvida e de 8% para os valores da intensidade de cinzas.

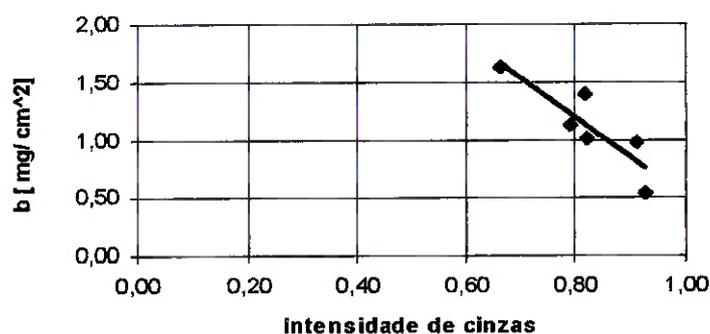


Figura 4.3 Curva de calibração obtida ao usar um STI

Para analisar o comportamento das curvas de calibração foi construído o gráfico da figura 4.4, com as curvas de calibração desenvolvidas nesta metodologia junto com a curva de calibração obtida por Krückels [9].

Através da análise do gráfico da figura 4.4 pode-se definir que a densidade de massa absorvida é diretamente proporcional a intensidade da cor formada. Quando a intensidade da cor formada é próximo de zero, ou seja a cor formada é muito escura, a densidade de massa absorvida está por volta de 3 mg / cm² para o STI e 1.6 mg / cm² para os valores obtidos pelo espectro-fotômetro

A correlação obtida pelo (STI) cobre os intervalos dos pontos 0,6 < %C < 0,9. A correlação obtida pelo espectro fotômetro cobre o intervalo de 0,1 < %C_E < 0,90.

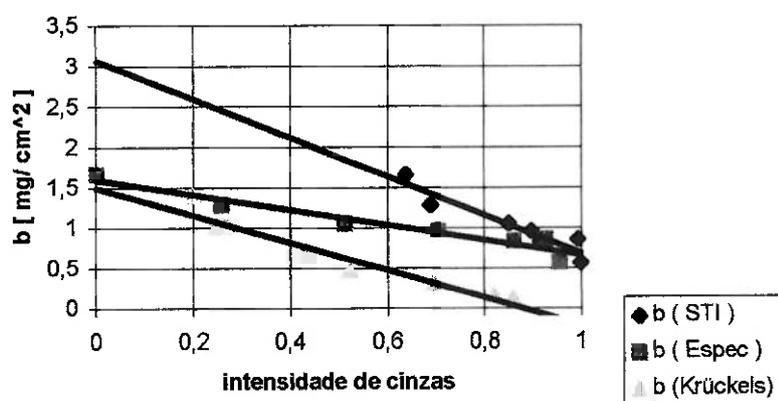


Figura 4.4 Curvas de Calibração

CAPÍTULO 5

5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresenta-se neste capítulo as conclusões do trabalho e as recomendações para futuros trabalhos nesta linha de pesquisa.

5.1 CONCLUSÕES

O desenvolvimento da método de avaliação do coeficiente local de transferência de massa através da técnica de absorção, permite analisar diversos tipos de escoamento com objetivo de avaliar o coeficiente de transferência de calor local. Foram obtidas curvas de calibração de forma rápida e a um baixo custo. As curvas de calibração podem ser usadas no cálculo do coeficiente de transferência de calor a partir de experimentos de transferência de massa. A vantagem em usar métodos de absorção é o baixo tempo de ensaio necessário para absorver a amônia, por volta de 50 segundos. Esse fato permite ensaiar um número elevado de amostras a um tempo reduzido, o que é possível com o método de evaporação, mas difícil de realizar com os métodos de sublimação. No entanto, os métodos de evaporação não permitem visualizar os escoamentos de forma simples e a baixo custo, o que é possível com o presente método, ao usar absorção da amônia a usar um sistema de gel a base de íons manganês para cobrir a superfície. Foi utilizado, para este trabalho, uma nova combinação de compostos a base de sulfato de manganês, diferentemente daqueles utilizados por outros autores. Esse composto é mais barato e fácil de ser adquirido, com resultados muito bom quanto ao contraste após a absorção da amônia. A análise dos resultados foi feita utilizando-se duas ferramentas o STI, ou sistema de tratamento de imagem, e um espectro-fotômetro. Os resultados obtidos pelo STI foram semelhantes aos resultados obtidos pelo espectro-fotômetro. O STI permite medir a cor da amostra em

termos de intensidade de cinza e a eficiência desse sistema pode ser melhorada ao desenvolver um software específico para análise.

Foram desenvolvidas diversas curvas de calibração e obteve-se uma correlação direta entre a intensidade de cinzas da camada formada, e a densidade de massa absorvida.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados favoráveis obtidos no desenvolvimento desta metodologia recomenda-se para trabalhos futuros desenvolver um sistema de controle de dosagem de amônia para adaptar no aparato experimental desenvolvido. Esse sistema teria como objetivo medir a quantidade de gás adicionado no aparato experimental, juntamente com um controle da velocidade do escoamento. Com esses valores poder-se-ia eliminar a análise química para avaliar a massa de amônia absorvida. Neste caso, ao injetar uma pequena quantidade de amônia, somente o suficiente para ser absorvida pela lâmina de papel, poder-se-ia considerar que toda a massa injetada seria absorvida pelo papel. Neste caso seria possível relacionar diretamente a massa absorvida com a intensidade de cinza formada. Outra sugestão é o desenvolvimento de uma nova câmara de distribuição que permitisse colocar duas ou mais lâminas de papel equidistantes entre si, assim poderia-se verificar, se a quantidade de amônia está sendo suficiente para reagir somente com a primeira lâmina. A massa absorvida poderia ser verificada pela análise química desenvolvida nesta dissertação.

Para minimizar as incertezas associadas ao STI poder-se-ia desenvolver um *software* específico para leituras da intensidade de cinza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .

- 1 . Eckert,E.R.G. **Analogies to heat transfer processes in measurement in heat transfer**. Hemisphere, New York , p.397-423, 1976.
- 2 . Incropera,F.P.; de Witt,D.P . **Fundamentals of heat and mass transfer** . 2 th ed. John Wiley & Sons, New York, 1985.
- 3 . Kottke,V.; Blenke,H . **Meßmethoden Konvektiver Stoffübertragung**. Chemie Ing-Tech. 50 (1978) Nr.2 , S. 81 - 90 .
- 4 . Kruckels,W. **Eine Methode zur photometrischen Bestimmung örtlicher Stoffübergangszahlen mit Hilfe chemischer Nachweisreaktionen** .Chem-Ing-Tech. 41 (1969) S.427/433.
- 5 . Kottke,V. **Techniques for the visualization of gas flows** . International Chemical Engineering 22 (1982) N° 2 , S 206-216 .
- 6 . K.Varol .; S.A. Beg , Ankara . **A Novel Technique for Mass Transfer Studies** . Wärme und Stoffübertragung , Bd. 4 (1971) S. 82-86 .
- 7 . D.B.Utton and M.A.Sheppard . **The Determination of convective Heat Transfer by the Measurement of Mass Transfer Using a New Optical Technique** .Soloukin, R.I & Afgan, N.H. (ed) , "Measurement Techniques in Heat and Mass Transfer " , Hemisphere , 1985 p 154 - 165
- 8 . Presser,K. H.: **Die Messung von konvektiven Stoffübergangszahlen bei Thymolsublimation in Luft**. Wärme und Stoffübertragung , Bd 4 (1971) S. 77 - 81
- 9 . Krückels, W.: **Eine Methode zur photometrischen Bestimmung örtlicher Stoffübergangszahlen mit Hilfe chemischer Nachweisreaktionen**.Dissertação na Universidade de Stuttgart. 1969
- 10 . Kottke, V .: **Einfluß des Anströprofls auf den örtlichen Stoffübergang an Platten endlicher Dicke** . Dissertação na Universidade de Stuttgart 1976 .
11. Mizushina , T., **The Electrochemical Method in Transport Phenomena** , in T . F . Irvine and J.P. Hartnett (eds) , "Advances in Heat Transfer , " vol 7 Academic, New York , 1971 .

- 12 . Lloyd, J. R Sparrow , E. M., and Eckert, E. R. G ., **Local Natural Convection Mass Transfer Measurements** , J Electrochem . Soc. , Vol. 119 , pp 702- 707, 1972
- 13 . Colello, R. G. , and Springer, G. S. , **Mass-Transfer Measurements with the Technique of Electrochemiluminescence** , Int. J. Heat Mass Transfer , vol. 9 , p 1391, 1966
- 14 . Howland, B. , Springer, G. S. and Hill , M. G. , **Use of Electrochemiluminescence in Visualizing Separated Flows**, J. Fluid Mech. , vol. 24 , p 697, 1966
- 15 . Goldstein, R. J.; Cho , H.H. **A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphtlene Sublimation** . Experimental Thermal and Fluid Science, v.10 , p 419-434 , 1995 .
- 16 . Bayón,J.J.G.; **Estudo experimental da intensificação de transferência de calor através de vórtices longitudinais com uso da analogia calor-massa** . Exame de qualificação apresentado à USP para a obtenção do título de Mestre em Engenharia p 36-48 . 1995
- 17 . Presser , K.H.; **Die Messung von konvektiven Stoffübergangszahlen bei Sorption mit chemischer Bindung** .Wärme und Stoffübertragung , Bd. 4 (1971) S. 187-196
- 18 . Krückels , W. **Photometrische Messung des örtlichen Stoffüberganges an querangeströmten Kreiszyllindern** . Chemie - Ing-Techn. 41. (1969) S.1068 - 1076
- 19 . Krückels , W.; Kottke, V.; **Untersuchung über die Verteilung des Wärmeübergangs an Rippen und Rippenrohr-Modellen**. Chemie - Ing.-Techn 42. (1970) . S 355-362
- 20 . Kottke , V .; Blenke , H .; Schmidt , K. G. **Eine remissionsfotometrische Meßmethode zur Bestimmung örtlicher Stoffübergangskoeffizienten bei Zwangskonvektion in Luft** . Wärme und Stoffübertragung 10 (1977) S. 9-21
- 21 . Kottke , V. Schmidt , K.G. **Measuring Techniques for Determination of local Mass and Heat Transfer in Industrial Scale** Soloukin , R.I & Afgam , N.H. (ed) "Measurement techniques in Heat and Mass Transfer" , Hemisphere , 1985 .
- 22 . Kottke , V .; Blenke , H .; Schmidt , K.G .; **Messung und Berechnung des örtlichen**

und mittleren Stoffübergangs an stumpf angeströmten Kreisscheiben bei unterschiedlicher Turbulenz . Wärme und Stoffübertragung 10 (1977) S. 89 - 105

- 23 . Kottke , V .; Blenke , H .; Schmidt , K. G. **Bestimmung des örtlichen und mittleren Stoffübergangs an längsangeströmten Platten endlicher Dicke mit Ablösen und Wiederanlegen der Strömung** Wärme - und Stoffübertragung 10 (1977) S. 217 - 232
- 24 . Kottke , V .; Blenke , H .; Schmidt , K. G. **Verfahren zur Bestimmung örtlicher Stoff- und Wärmeübertragung an beliebig geformten Oberflächen** Wärme & Stoffaustauschen „ verfahrenstechnik " 16 (1982) Nr. 6 , S. 504 - 509
- 25 . Kottke , V.; Schüz , G. **Local Heat Transfer and Heat Flux Distributions in finned Tube Heat Exchangers** . Chem . Eng . Technol . 15 (1992) 417-424
- 26 . Kottke , V.; Gaiser , G.; **Flow Phenomena and Local Heat and Mass Transfer in Corrugated Passages** . Chem. Eng . Technol . 12 (1989) 400-405
- 27 . Sogin , H.H. **Sublimation from disks to air streams flowing normal to their surfaces** . Transactions of the ASME , v.82 , p.61-69, 1959.
- 28 . Sogin , H.H. **An improved correlation of Stagnation point mass transfer from naphthalene circular disks facing uniform airstreams** . Journal of Heat Transfer ,v.113, p.772-773 , 1991.
- 29 . Sparrow,E.M.; Geiger , G.T. **Local and average heat transfer characteristics for a disk situated perpendicular to a uniform flow** . Journal of Heat Transfer, v.107, p.321-326 , 1985
- 30 . Sparrow,E.M.; Ramsey,J.W.; Mass,E.A. **Effect of finit width on heat transfer and fluid flow about an inclined rectangular plate** . Journal of Heat Transfer, v.101, p. 199-204 , 1979.
- 31 . Goldstein,R.J.; Karni,J. **The effect of a wall boundary layer on local mass transfer from a cylinder crossflow.** Journal Heat Transfer , v. 113, p.260-267 , 1984.

- 32 . Goldstein,R.J.; Karni,J. ; Zhu,Y. **Effect of boundary conditions layer on mass transfer near the base of a cylinder in cross flow** . Journal Heat Transfer , v. 112 , p. 501-504 , 1990.
- 33 . Goldstein,R.J.; Yoo,S.Y.; Chung,M.K. **Convective mass transfer from square cylinder and its base place** . Journal of Heat Mass Transfer, v.33, p.9-18, 1990.
- 34 . Yoo,S.Y.; Goldstein,R.J.; Chung, M.K. **Effects of angle of attack on mass transfer from a square cylinder and its base plate**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v.36, n.9 , p.371-381, 1993
- 35 . Chyu,M.K.; Goldstein ,R.J. **Influences of a cylinder array on the mass transfer from a flat surface** . International Journal of Heat and Mass Transfer, v.34 , p. 2175-2186, 1992.
- 36 . Saboja, F.E.; Sparrow, E.M. **Local average transfer coefficients for one-row plate fin and tube heat exchanger configuration** . Journal of Heat Transfer, v.96, p.265-272, 1974.
- 37 . Xiao,Q. et al . **Experimental study on effect intervall tube cylinder on heat and mass transfer characterstcs of corrugated plate fin and tube exchanger configuration** . Journal of Heat Transfer, v.114 , p. 755-759, 1992.
- 38 . Merker, G.P.; Hanke,H. **Heat transfer and pressure drop on the shell-side of tube-banks having oval-shaped tubes**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v.29, p.1903-1909 , 1989.
- 39 . Sparrow,E.M.; Kang,S.S. **Longitudinally-finned cross-flow tube banks and their heat transfer and pressure drop characteristics**. International Journal of Heat and Mass Transfer , v.28, p.339-350 , 1985.
- 40 . Sparrow , E.M.; Hajiloo,A. **Measurements of heat transfer and pressure drop for an array of staggered plates aligned parallel to an air flow**. Journal of Heat Transfer , v. 102 , p.426-432, 1980.
- 41 . Kumori, K.; Iguchi, A. ; Izumi, R. **Characteristics of fully developed turbulent flow and mass transfer in a square duct** . International Chemical Engineering , v.20, p.219-225 , 1980.
- 42 . Sherwood ,T.K.; Trass, O. **Sublimation mass transfer through compressible boundary layers on a flat plate** . Journal of Heat Transfer , v.82 , p. 313-324 , 1960.

- 43 . Sogin, H.H. **Laminar transfer from isothermal spanwise strips on a flat plate.** Journal of Heat Transfer, v.82, p.53-63 , 1960.
- 44 . Sparrow, E.M. ; Cur, N. **Turbulent heat transfer in a symmetrically or asymmetrically heated flat rectangular duct with flow separation at inlet.** Journal of Heat Transfer, v 104, p. 82-89, 1982.
- 45 . Sparrow,E.M.; Garcia ,A.; Chuck, W. **Turbulent duct flow with streamwise nonuniform heating at the duct wall.** International Journal of Heat and Mass Transfer , v.30, p.175-185 , 1987.
- 46 . Han, J.C.; Chandra,P.R.; Laus,S.C. **Local heat/mass transfer distributions around sharp 180 deg. turns in two-pass smooth and rib-roughened channels.** Journal Heat Transfer , v.110, p.91-98 , 1988.
- 47 . Lee,Y.N. **Heat transfer and pressure drop characteristics of an array of plates aligned at angles to the flow in a rectangular duct.** International Journal of Heat and Mass Transfer, v.29, p. 1553-1563, 1986.
- 48 . Lee,Y.N. **Heat transfer and pressure drop characteristics of an assembly of partially segmented plates.** Journal of Heat Transfer , v.111 ,p.44-50 , 1989.
- 49 . Sparrow,E.M.; Tao, W. **Symmetricvs . asymmetric periodic disturbances at wall of heated flow passage .** International Journal of Heat Mass Transfer , v.27, p.2133-2134 , 1984.
- 50 . Molki, M.; Yuen ,C.M. **Effect of interwallspacing on heat transfer and pressure drop in a corrugated wall duct.** International Journal of Heat and Mass Transfer, v.29, p.987-997, 1986.
- 51 . Souza Mendes,P.R.; Sparrow,E.M. **Periodically converging-diverging tubes and turbulent heat transfer , pressure drop , fluid flow and enhancement characteristics .** Journal of Heat Transfer , v.106 , p.55-63 , 1984.
- 52 . Sparrow,E.M.; Vemuri,S.B.; Kadle, D.S. **Enhanced and local heat transfer , pressure drop, and flow visualization for arrays of block like electronic components.** International journal of Heat and Mass Transfer, v.26, p.689-699, 1983.
- 53 . Baskakov,A.P.; Suprun , V.M. **The determination of the convective component of the coefficient of heat transfer to a gas in a fluidized bed.** International Chemical Engineering , v.12, p.53-55, 1972.

- 54 . Goldstein,R.J.; Spores,R.A. **Turbulent transport on endwall in the region between adjacent turbine blades.** Journal Heat Transfer, v.110, p.862-869, 1988.
- 55 . Koyama,H.; Ohsawa , S.; Nakayama , A. **Mass transfer from a rotating inclined plate.** Journal of Heat Transfer , v. 103, p.204-211, 1981.
- 56 . Kreth,F.; Taylor, J.H.; Chong,J.P. **Heat and mass transfer from rotating disk.** Journal of Heat Transfer , v.81, p.95-105, 1959.
- 57 . Lee, Y.N.; Minkowycz,W.J. **Heat transfer characteristics of the annulus of two coaxial cylinders with one cylinders rotating.** International Journal of Heat and Mass Transfer, v.32, p.711-722, 1989.
- 58 . Sparrow ,E.M.; Chaboki, A. **Heat transfer coefficients for a cup like cavity rotating about its own axis.** International Journal of Heat and Mass Transfer, v.25, p.1333-1341 , 1982.
- 59 . Sparrow ,E.M. ; Preston , C.S. **Heat transfer from rotating annular fins .** International Journal of Heat and Mass Transfer , v.29 , p.831-839, 1986.
- 60 . Sparrow, E.M.; Kangs , S.S. **Heat and mass transfer adjacent to the free end of a rotating cylinder .** International Journal of Heat and Mass transfer , v.30 , p. 807-809, 1987.
- 61 . Brandowski,J.; Ryski, W. **Free convection mass transfer from horizontal plates.** International Journal Heat and Mass transfer , v. 19, p.827-838, 1976.
- 62 . Goldstein,R.J.; Sparrow,R.M.; Jones,D.C. **Natural convection mass transfer adjacent to horizontal plates.** Journal of Heat Mass Transfer , v.16, p. 1025-1035 , 1973.
- 63 . Sparrow,E.M.; Niethammer ,J.E. **Natural convection in ternary gas mixture. Application to the naphthalene sublimation technique.** Journal of Heat Transfer , v.101, p.404-410, 1979.
- 64 . Sparrow,E.M.; Bahrami, P.A. **Experiments on natural convection heat transfer on the fins of a finned horizontal tube.** International Journal of Heat and Mass Transfer, v.23, p.1555-1560 , 1980.
- 65 . ANSI / ASME PTC 19.1 -1985. **Measurement Uncertainty Instrument and apparatus.** The American Society of Mechanical Engineers , p.1-65, 1985.