

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

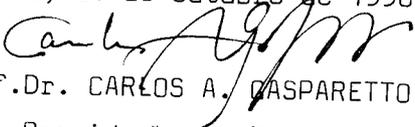
**SIMULAÇÃO DA INCRUSTAÇÃO DE PROTEÍNAS DO
PROCESSAMENTO ANIMAL NO INTERIOR DE TUBOS**

JEAN LOPEZ DEL MAR

Orientador: PROF.DR. CARLOS ALBERTO GASPARETTO

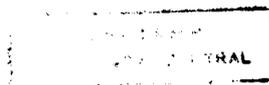
PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por JEAN LOPEZ DEL MAR e aprovada pela Comissão Julgadora em 21.10.96
Campinas, 21 de outubro de 1996


Prof.Dr. CARLOS A. GASPARETTO
Presidente da Banca

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Alimentos

**Campinas - SP
Outubro/1996**



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	L881s
V. E.	
PREC. 664,96	
PREC. 28,11,00	
DATA 23/11/96	
N.º CDDC M.00015169	

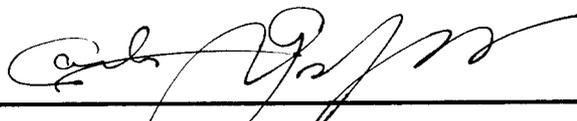
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

L881s Lopez del Mar, Jean
 Simulação da incrustação de proteína do processamento animal no interior de tubos / Jean Lopez del Mar, SP: [s.n.], 1996.

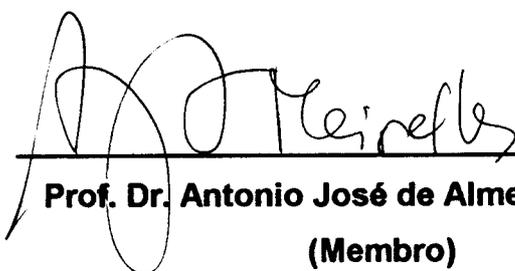
Orientador: Carlos Alberto Gasparetto
 Dissertação (mestrado)-Universidade Estadual de Campinas.
 Faculdade de Engenharia de Alimentos.

I.Incrustações. 2.Tubos. 3.Proteínas. I.Gasparetto, Carlos Alberto. II.Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. III.Título.

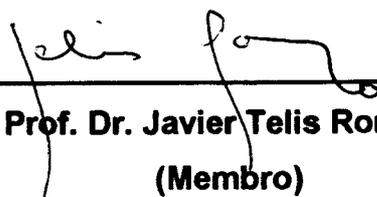
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto
(Orientador)



Prof. Dr. Antonio José de Almeida Meirelles
(Membro)



Prof. Dr. Javier Telis Romero
(Membro)

Prof. Dr. Satoshi Tobinaga
(Membro)

A meus filhos Jean Pierre. Jovic

Aos meus queridos pais Nestor e Estela

**A força telúrica dos Andes faz com
que o homem torne seu espírito de
trabalho cada vez mais forte, até
alcançar a sua verdadeira essência
de progresso e de fé no futuro.**

J. L. M.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

À faculdade de Engenharia de Alimentos pela oportunidade de realização deste trabalho.

À Faculdade de Pesquería da Universidad Nacional "San Luís Gonzaga" de Ica, pela oportunidade brindada para a realização do curso de mestrado.

Ao Prof. Carlos Alberto Gasparetto, pela orientação, pela amizade, pela experiência compartilhada e principalmente, pelos momentos de descontração.

Ao prof. Satoshi Tobinaga pelas valiosas sugestões durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pelas importantes sugestões que engrandeceram este trabalho.

À CNPq, pela bolsa concedida durante a realização do curso de Mestrado.

À minha família em especial a Sonia, pelo apoio moral brindado durante o desenvolvimento deste trabalho.

À meus amigos da faculdade Oscar, Roger e Aroldo.

Aos funcionarios da FEA, em particular aos da Biblioteca, da Coordenação de Pós-Graduação e do Centro de Informática.

Aos professores e funcionarios do DEA.

A todos aqueles que tornaram possível a realização deste trabalho.

Agradeço

3.2. Propriedades termo-físicas dos líquidos da indústria	16
3.2.1. Calor específico	16
3.2.2. Densidade	17
3.2.3. Condutividade Térmica	18
3.2.4. Viscosidade	19
3.3. Concentração de sólidos dos líquidos	20
3.3.1. Concentração mássica	21
3.3.2. Fração mássica	21
3.3.3. Densidade da mistura	21
3.3.4. Concentração molar	21
3.3.5. Densidade molar da mistura	22
3.3.6. Fração molar	22
3.3.7. Massa molecular da mistura	22
3.3.8. Volume molar	27
3.4. Difusividade	27
4. MÉTODOS	29
4.1. Modelos matemáticos utilizados na simulação do fenômeno da incrustação	29
4.1.1. Perfil de velocidade	29
4.1.2. Perfil de temperatura	31
4.1.3. Perfil de concentração	32
4.1.4. Coeficiente de transferência de massa	33
4.2. Transferência de calor em trocadores de calor	36

4.2.1. Equações de transferência de calor	37
5. SIMULAÇÃO DO FENÔMENO DA INCRUSTAÇÃO	45
5.1. Dinâmica da incrustação	45
5.2. Formulação do modelo matemático	46
5.2.1. Algoritmo do processo da incrustação dinâmica	47
5.2.2 Algoritmo da simulação da incrustação	50
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
6.1 Viscosidade dos líquidos	52
6.2. Simulação do processo	53
6.3 Efeito da resistência da incrustação	56
7. CONCLUSÕES	61
8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	62
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
10. APÊNDICE	67
APÊNDICE A 1. Dedução do perfil da temperatura	68
APÊNDICE A 2. Concentração de saturação da espécie A (proteína)	73
APÊNDICE A 3. Programa Fouling dos líquidos	74

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 4.1- Distribuição de temperaturas no trocador	43
FIGURA 5.1- Análise da incrustação num tubo circular	46
FIGURA 5.2- Diagramas de fluxo do algoritmo da incrustação	49
FIGURA 5.3- Algoritmo do processo dinâmico da incrustação	51
FIGURA 6.1- Redução do diâmetro do tubo em função do tempo	54
FIGURA.6.2- Redução do diâmetro do tubo em função do comprimento	55
FIGURA 6.3- Redução da concentração em função do comprimento	56
FIGURA 6.4- Coeficiente operacional versus coeficiente limpo (Bovino)	57
FIGURA 6.5- Coeficiente operacional versus coeficiente limpo (Suíno)	58
FIGURA 6.6- Coeficiente operacional versus coeficiente limpo (Frango)	59
FIGURA 6.7- Coeficiente operacional versus coeficiente limpo (Peixe)	60

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1- Modelos cinéticos da incrustação	7
TABELA 3.1- Composição do líquido de pescado	12
TABELA 3.2- Composição de líquido de frango	13
TABELA 3.3- Composição do líquido de bovino	14
TABELA 3.4- Composição de líquido de suíno	15
TABELA 3.5- Composição de aminoácidos das proteínas	23
TABELA 3.6- Composição de ácidos graxos	26
TABELA 6.1- Variação da viscosidade com a temperatura	52

NOMENCLATURA

$\alpha, \alpha_o, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$	constante de deposição definido na tabela (2.1)	[-]
A	área de transferência de calor	[m ²]
A_i	área de superfície interna do tubo	[m ²]
A_o	área de superfície externa do tubo	[m ²]
A_c	área de superfície limpa do tubo	[m ²]
C	densidade molar da solução equação (3.10)	[kgmol/m ³]
\bar{C}_A	concentração local de saturação na interface líquido-sólido	[kgmol/m ³]
C_b	concentração média na tabela (2.1)	[-]
C_s	superfície da concentração na tabela (2.1)	[-]
C'_{A0}	concentração de saturação da espécie A	[kgmol/m ³]
C_i	concentração molar do componente i	[kgmol/m ³]
C_A	concentração molar da espécie A equação (3.11)	[kgmol/m ³]
C_p	calor específico do fluido	[J/kg K]
C_w	conteúdo de água no líquido (fração mássica)	[-]
C_g	concentração molar da gordura	[kgmol/m ³]
C_n	concentração molar do n-ésimo componente	[kgmol/m ³]
C_p	concentração molar da proteína	[kgmol/m ³]
C_f	conteúdo de gordura no líquido (fração mássica)	[-]
C_1	constante de probabilidade de fixação na tabela (2.1)	[-]

C_b	massa de concentração do componente principal	[kgmol/m ³]
C_s	superfície de concentração	[kgmol/m ³]
D_f	difusividade da incrustação	[m ² /s]
d_0	diâmetro da partícula na tabela (2.1)	[-]
du	diferencial de velocidade	[m/s]
dy	diferencial da distancia à parede	[m]
D	difusividade molecular	[m ² /s]
D_{AB}	difusividade binária	[m ² /s]
D_L	diâmetro de tubo limpo	[m]
D_f	diâmetro de tubo incrustado	[m]
D_i	diâmetro interno do tubo	[m]
D_E	diâmetro externo do tubo	[m]
E	energia de activação	[J]
F	conteúdo da gordura no líquido (fração mássica)	[-]
f	fator de atrito do tubo	[-]
G	vazão mássica do líquido na equação (4.20)	[kg/s]
h	coeficiente local de transferência de calor por convecção	[W/m ² K]
h_o	coeficiente de película externo	[W/m ² K]
h_{io}	coeficiente de película interno	[W/m ² K]
J_h	fator de Colburn	[-]
J	fluxo de massa da espécie incrustante normal à parede	[kg/s]
k_d	coeficiente de deposição na tabela (2.1)	[-]

k_m	constante da taxa de reação química na tabela (2.1)	[-]
k_r	taxa constante de primeira ordem na tabela (2.1)	[-]
K_{XA}	coeficiente local de transferência de massa	[kgmol/s m ²]
K_f	condutividade térmica do depósito da incrustação	[W/m K]
K_m	coeficiente de transferência de massa	[kgmol/s m ²]
L	comprimento do tubo	[m]
LMDT	diferença média logaritmo de temperatura	[K]
m	depósito de massa	[kg/m ²]
M_i	peso molecular do componente (i)	[kg/kgmol]
M_A	peso molecular da espécie A	[kg/kgmol]
\dot{m}_d	taxa de deposição	[kg/m ² .s]
\dot{m}_r	taxa de remoção	[kg/m ² .s]
N_A	fração molar da espécie A	[-]
Q	taxa de transferência de calor	[W]
\dot{q}	fluxo de calor	[W/m ²]
P_v	função de probabilidade	[-]
Pr	número de Prandtl	[-]
Pr_t	número de Prandtl turbulento	[-]
R	constante universal dos gases	[Pa m ³ /mol K]
r	posição radial	[m]
r_o	raio do tubo	[m]

RF_o	resistência da incrustação externa do tubo	$[\text{w}/\text{m}^2 \text{ K}]$
RF_i	resistência da incrustação interna do tubo	$[\text{w}/\text{m}^2 \text{ K}]$
R_w	resistência da parede por unidade de área	$[\text{m}^2 \text{ K} / \text{W}]$
R_d	fator de incrustação	$[\text{m}^2 \text{ K} / \text{W}]$
Re	número de Reynolds	$[-]$
Sc	número de Schmidt	$[-]$
S	probabilidade de fixação na tabela (2.1)	$[-]$
T_o	temperatura interface líquido-sólido	$[\text{K}]$
T	perfil da temperatura definida na equação (4.7)	$[-]$
T_v	temperatura do vapor	$[\text{K}]$
T_1	temperatura de entrada do líquido	$[\text{K}]$
T_2	temperatura de saída do líquido	$[\text{K}]$
T	tempo no apêndice A.1	$[\text{s}]$
t_1	variação do tempo	$[\text{s}]$
t_s	temperatura da interface depósito-fluido na tabela (2.1)	$[-]$
ΔT_L	diferença LMDT de temperaturas	$[\text{K}]$
U	coeficiente global de transferência de calor	$[\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}]$
U_b	velocidade média do fluido na tabela (2.1)	$[-]$
U_c	coeficiente global limpo	$[\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}]$
U_f	coeficiente operacional	$[\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}]$
u^*	Velocidade de atrito	$[\text{m}/\text{s}]$
V	velocidade média do líquido	$[\text{m}/\text{s}]$

\bar{V}	volume molar do soluto	[m ³ /kg mol]
W	conteúdo de água (fração mássica)	[-]
W_o	vazão mássica do líquido	[kg/s]
X	fração molar da espécie i	[-]
Y^+	distância adimensional a partir da parede	[-]

NOTAÇÃO UTILIZADA NO PROGRAMA COMPUTACIONAL

a	constante solubilidade na ausência de sal	[-]
b	constante de (salting out) da concentração de saturação	[-]
C	densidade molar da mezcla binaria	[kgmol/m ³]
Ca	perfil da concentração adimensional	[-]
Ca_l	concentração do líquido	[Kg/m ³]
Ca_0	concentração de saturação do líquido	[kgmol/m ³]
C_{pav}	calor específico do líquido,	[Joule/kg k]
C_{bav}	concentração média do líquido	[kgmol/m ³]
C_{bav0}	concentração de entrada do líquido	[kgmol/m ³]
C_w	conteúdo de água (fração mássica)	[-]
C_f	conteúdo da gordura (fração mássica)	[-]
D_{cab}	variação da concentração do líquido	[kgmol/m ³]
D_{tb}	variação da temperatura média	[K]
D_{tv0}	temperatura de ingresso do líquido	[K]
D_z	variação de comprimento do tubo	[m]
DR	variação do raio no tubo	[m]
dt	variação de tempo	[s]
F	fator de fricção	[-]
$h_{o=s}$	coeficiente de transferência de calor local	[W/m ² k]
K_x	coeficiente de transferência de massa local	[kgmol/s m ² mol]
K	conductividade térmica do líquido	[W/m k]

Ma	massa molecular da proteína do líquido	[kg/kgmol]
qro	fluxo de calor local	[W/m ²]
Ps	concentração inicial do líquido	[kgmol/m ³]
Prt	número de Prandtl turbulento	[-]
Pr	número de prandtl	[-]
Pbavg	densidade do líquido	[kg/m ³]
Pfavg	densidade da camada da incrustação	[kg/m ³]
R	posição radial	[m]
rinit	valor limite da camada da incrustação	[m]
Sc	número de Schmidt	[-]
TT0	temperatura da interface líquido-sólido	[K]
TT	perfil da temperatura	[-]
u	viscosidade média do líquido	[kg/m s]
Vz	velocidade média do líquido	[m]
x	comprimento do tubo	[m]

Letras gregas

$\gamma, \varepsilon_m, \phi_t$	valores definidos nas equações	4.1 a 4.2 e 4.20
$\alpha, \omega, \delta, \theta$	valores definidos nas equações	4.12 a 4.15
τ	tensão de cisalhamento	[Pa]
ψ	valor definido na equação	3.15
ρ	densidade	[kg/m ³]
μ	viscosidade	[kg/m s]

Sub-índices

c	superfície limpa
E	externo
<i>i</i>	interno
f	tubo incrustado
<i>L</i>	tubo limpo
t	temperatura da parede
v	vapor.

Master Thesis: "SIMULATION OF PROTEIN SCALING IN TUBES FOR ANIMAL PROCESSING".

Author: *Eng. Jean Lopez del mar.*

Supervisor: *Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto*

Department of Food Engineering-*FEA-UNICAMP-Outubro /1996.*

SUMMARY

An algorithm was developed to calculate the overall heat transfer coefficient (U) for the flow inside tubes, including scaling from protein content typical in the animal processing industry: Beef, Pork, Chicken and fish and field data. Those industry suffer from scaling which strongly affect thermal performance of heat exchanger thus forcing cleaning stop-over and reducing operational period. Fluid composition is based on bibliography and field data. From a model of liquid composition and a kinetic scaling modeled in the literature, an operational calculation algorithm was developed. It was considered that liquid phase is in equilibrium with solid deposited phase and the deposition process is entirely governed by mass transfer. Results show higher deposition rate for beef liquids followed by pork, chicken and fish, therefore reduction in tube diameter is faster for beef and so on. The overall operational coefficient (U_r) showed a linear dependence from thermal resistance of scaling.

Key words: Scaling, tube, protein.

1. INTRODUÇÃO

A formação do depósito de incrustação é um fator significativo nas operações contínuas nas plantas de processamento de alimentos. A incrustação por alimentos é muito severa sob aspectos energéticos e sanitários, demandando a limpeza constante. Nas indústrias e processos de produtos não alimentícios, essas limpezas são feitas em ciclos muito mais longos, às vezes anualmente.

A incrustação é um processo típico da interface e é determinado exclusivamente pela relação entre a superfície da parede e os componentes do fluido, que ocorre na região da subcamada laminar de escoamento. A incrustação é um fenômeno que ocorre com ou sem a presença de um gradiente de temperatura.

A incrustação pode ser definida como a deposição de uma camada de material isolante, sobre a superfície de transferência de calor. Essa deposição produz uma diminuição do desempenho termo-hidráulico ao diminuir a transferência de calor e aumentar a queda da pressão.

As informações sobre incrustações eram muito escassas até final da década de 50. No ano de 1959, Kern & Seaton apresentaram o modelo para incrustação particulada e para outras incrustações. Nas décadas 70 e 80 viu-se um crescimento exponencial de publicações no tema, sendo uma tendência reforçada pelo aparecimento do periódico "Fouling Prevention Research Digest". A razão principal dessa explosão foi a crise de energia e a maioria absoluta dos artigos refere-se à incrustação no escoamento de gases, poucos para água e quase nenhum para outros líquidos. A razão desse interesse é ditada pelo grande problema de recuperação de energia nos trocadores de calor para gases existentes nas usinas termoelétricas, que são responsáveis por uma significativa participação na matriz energética de muitas regiões deste planeta.

Apesar de que não existirem dados estatísticos atuais, no passado recente algumas publicações apresentaram estimativas dos custos decorrentes do efeito

de incrustações. Segundo AERE citado por THACKERY (1979), os custos no Reino Unido atingiam a faixa US \$ $(0,730 - 1,20) \times 10^9$ e de acordo com I.F.S, (1979) nos E.U.A esses custos estavam na faixa US \$ $(1,80 - 2,90) \times 10^9$ anual. No caso do Brasil não existem dados publicados referentes aos custos devido ao efeito da incrustações.

1.1-Objetivos

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um algoritmo para estudar as incrustações em tubos de trocadores de calor nos escoamentos de líquidos da indústria de processamento de aves, bovinos, pescado e suíno. Esse algoritmo leva em conta o efeito da resistência da incrustação e portanto, contém o parâmetro tempo, está incrustação ocorre devido à presença de proteínas e gorduras. Os líquidos da indústria de processamento de produtos de origem animal são típicos exemplos que levam a esse tipo de incrustação. O algoritmo desse tipo é útil para ser utilizado no cálculo de: equipamentos, tempos de processamento, frequência de limpeza dos equipamentos, contaminação dos produtos e qualidade dos produtos.

O trabalho presente foi desenvolvido nas seguintes fases:

- primeira fase consistiu no levantamento da composição típica dos líquidos nas indústrias, que contém proteínas e gorduras e que são aquecidos e/ou concentrados, a fim de que a simulação se ajuste melhor às condições reais de processamento;
- A segunda fase foi analisar e fixar todas as condições de processo e estimar todas as propriedades termo-físicas dos líquidos através das correlações (ρ, μ, k, C_p);
- Na terceira fase foram utilizadas as correlações disponíveis na literatura, para determinar os perfis de velocidade, temperatura e de concentração e conseqüentemente estimar o coeficiente de transferência de massa. Utilizou-se um procedimento numérico para a resolução das equações diferenciais aplicadas a um

sistema de geometria cilíndrica, relacionando o balanço de massa com o tempo. Foram calculadas as variações da concentração da espécie (A) a variação da temperatura e a variação da coordenada da interface líquido-sólido e o raio interno. Portanto foi desenvolvido um algoritmo para a simulação da incrustação. O programa computacional está em linguagem Pascal, e seu detalhamento encontra-se no apêndice A.3;

- Na quarta fase são apresentados e discutidos os resultados que estão na forma de um coeficiente global de transferência de calor (U_t) e do raio interno dos tubos de troca térmica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1-Tipos de Incrustações

Existe uma variedade de mecanismos de incrustação conforme descrito por EPSTEIN (1981). A estrutura da classificação atual concebida e desenvolvida durante as décadas de 70 e 80 é baseada no processo físico-químico do fenômeno da incrustação.

Os tipos primários de incrustações são identificadas como:

A) Precipitação incrustante: cristalização de uma substância dissolvida que insolubiliza e se fixa sobre a superfície de transferência de calor; a ressolubilização é difícil;

B) Incrustação particulada: acumulação de sólidos finamente divididos e suspensos no escoamento que se acumulam sobre a superfície de transferência de calor;

C) Incrustação por reação química: formação de depósitos na superfície de transferência de calor por reação química de substância dissolvida, ou em suspensão, em que a superfície do tubo não reage;

D) Corrosão incrustante: acumulação de produtos de corrosão sobre a superfície de transferência de calor; ela isola térmicamente a superfície e promove a ligação de outros agentes;

E) Incrustação biológica: aderência de macroorganismos e/ou microorganismos a uma superfície de transferência de calor. Geralmente esses organismos propiciam o aparecimento de um lodo que recobre a superfície;

F) Incrustação por solidificação: solidificação de um líquido sobre uma superfície. Comumente ocorre no escoamento de uma mistura ou solução em que o equilíbrio termodinâmico leva a essa segregação.

2.2-Etapas Sucessivas na Incrustação

Para todos os tipos de incrustação são cinco as etapas sucessivas que mais comumente ocorrem (EPSTEIN 1981), a saber:

2.2.1-Iniciação

A iniciação é associada a um período de indução e está relacionada ao processo de nucleação sobre a superfície limpa de transferência de calor. Durante o período de indução a superfície é condicionada para adsorção da deposição. O fenômeno é usualmente observado na cristalização ou precipitação da incrustação e algumas vezes em outros tipos de incrustação. O processo acontece em algumas horas. Depois deste período de indução tem sido observado que a resistência à deposição do material incrustante aumenta com o tempo. Para todos os tipos de incrustações muitos pesquisadores têm reportado que o período de indução diminui quando a superfície é rugosa. Esta rugosidade proporciona um lugar adicional para a nucleação e adsorção. Em caso de bio-incrustação, a etapa inicial implica a adsorção sobre a superfície de polímeros e glicoproteínas, com a ação da superfície promovendo a criação de uma película na qual os microorganismos aproveitam para aderir às paredes.

2.2.2-Transporte

De todas as etapas conhecidas o transporte de matéria até a superfície é o mais estudado e o melhor compreendido do fenômeno da incrustação. Nesta etapa, o transporte resulta de uma variedade de processos que incluem: difusão, eletroforese, sedimentação, reação química, termoforese e impacto inercial. O transporte sendo de caráter difusional, a transferência de massa é descrita pela lei de Fick e esta pode ser utilizada nas diferentes formulações disponíveis na literatura.

2.2.3-Ligação

A ligação da espécie incrustante à parede resulta do transporte dessa espécie da região central do escoamento em direção à parede, sendo então depositada e aderida à superfície. As diferentes forças que atuam sobre as partículas e sua aproximação desempenham um papel decisivo na ligação da

espécie incrustante, são importantes todas as propriedades do sistema, incluídas aqui as condições e natureza da superfície de troca térmica.

2.2.4-Remoção

O escoamento atua sobre o depósito da incrustação propiciando sua remoção por dissolução, erosão ou quebra. A remoção depende do tipo particular de depósito, o qual pode variar com o tempo. Assim, o processo de remoção poderá variar durante o período no qual está ocorrendo a incrustação. A remoção do depósito por dissolução pode ser relacionada à solubilidade do material do depósito. A taxa de remoção é diretamente proporcional à quantidade de massa depositada e à tensão de cisalhamento sobre a superfície de transferência de calor. A contínua coexistência de remoção e deposição (especialmente com a deposição particulada) é mais facilmente encontrada nos escoamentos turbulentos.

2.2.5-Envelhecimento

O envelhecimento da incrustação inicia-se imediatamente após o material ser depositado sobre a superfície de transferência de calor. Esse processo inclui mudanças na estrutura química e física do material depositado. Tais mudanças ocorrem a um fluxo de calor constante, pois, este efeito gera maior solidez do depósito com relação ao tempo. Esta etapa de envelhecimento ainda é pouco conhecida.

2.3-Cinética das incrustações

Existem muitos modelos cinéticos de incrustações na literatura técnica, sendo o mais comum os modelos lineares para a queda de taxa de transferência de calor. Muitos desses modelos são apresentados em termos do fluxo de massa local (\dot{M}_d), são relacionados ao processo de deposição nestes modelos apresentados na tabela (2.1)

Tabela 2.1 Modelos cinéticos da incrustação (1981)

Fonte: Epstein (1981)

AUTOR	Fluxo de deposição= $(dm/d\theta)=\dot{M}_d$	Sistema descrito
McCabe et alii (1924)	$\dot{M}_d = a q = a_1 U \equiv a_2 / (a_3 + m)$	Incrustações em evaporadores ΔT constante
Kern et alii (1959)	$\dot{M}_d = a_4 U_b C_b$	Incrustação particulada e outras incrustações.
Parkins (1961)	$\dot{M}_d = J_s = J C e^{\frac{-E}{RT_s}}$	Incrustação particulada
Hasson (1962)	$\dot{M}_d = a_5 U^n \equiv \frac{a_6}{(a_7 + m)^n}$	Calor sensível de incrustação da solução CaCO ₃
Reitzer (1964)	$\dot{M}_d = K(C_b - C_s)^n = a_5 U^n$ Constante ΔT , constante a_5 , constante q	Evaporação de soluções saturadas
Bertlet et alii (1968)	$\dot{M}_d = K_d C_b = K_m C_b$	Transferência de massa convectiva das espécies depositáveis
Charleswort (1970)	$\dot{M}_d = K_d C_b$	Deposição de óxido ferro em fluxo de ebulição
Watkinson et alii (1970)	$\dot{M}_d = K_m (C_b - C_s) S a_0 =$ $a_0 K_m (C_b - C_s) C_1 e^{-E/RT_s} / (U^*)^2$	Incrustação particulada e reação química
Beal (1970)	$\dot{M}_d = K_d C_b = C_b / [(\frac{1}{k_a}) + (\frac{1}{S U^*})]$	Incrustação de partículas por vórtice e difusão browniana
Taborek et alii (1972)	$\dot{M}_d = a_9 r_v W^{\frac{-E}{RT_s}}$	Incrustação de água resfriada
Galloway (1973)	$\dot{M}_d = \frac{C_b}{(\frac{1}{K_m}) + (\frac{1}{K_r})}$ $= \frac{r_f D_f C_b}{(r_f D_f / K_m) + M}$	Transferência de massa convectiva com difusão de O ₂ através do depósito
Prieve et alii (1973)	$\dot{M}_d = k_d C_b = C_b / [(\frac{1}{k_a}) + (\frac{1}{k_r})]$	Deposição coloidal
Thomas Grigull (1974)	$\dot{M}_d = M_{do} e^{-am}$	Deposição de suspensões aquosas

O primeiro modelo matemático foi proposto por Mc Cabe & Robinson, para incrustações em evaporadores e está reportado por (EPSTEIN, 1981). As bases desse modelo originam-se de uma simples suposição de que a quantidade de matéria depositada no evaporador a um só tempo é proporcional à quantidade de líquido que foi evaporado, sendo ΔT (potencial térmico) constante.

Depois de muitos anos apareceria o segundo modelo proposto por (KERN & SEATON, 1959). Este modelo é o mais conhecido e utilizado pela maioria de pesquisadores para análise do fenômeno da incrustação dinâmica. O modelo tem a seguinte proposta:

$$(\text{Taxa Líquida Incrustação}) = (\text{Taxa de formação}) - (\text{taxa de remoção})$$

ou seja:

$$\frac{dm}{d\theta} = \dot{m} = \dot{m}_d - \dot{m}_r$$

Onde:

$$\frac{dm}{d\theta} = \dot{m} = \text{taxa de massa transferida}$$

$$\dot{m}_d = \text{taxa de deposição}$$

$$\dot{m}_r = \text{taxa de remoção}$$

A proposta de Kern & Seaton é que o modelo básico de deposição e remoção. A idéia é de que a incrustação líquida é a diferença entre dois processos simultâneos de deposição e remoção.

Kern & Seaton e muitos outros consideram que a taxa de deposição (\dot{m}_d) permaneça constante com o tempo e que a taxa de remoção (\dot{m}_r) é diretamente

proporcional a (\dot{m}) e que a taxa líquida da incrustação pode aumentar com o tempo porém seu comportamento do (\dot{m}) é aproximadamente assintótico, tendendo a um valor constante.

Os Modelos propostos por Hasson e Reitzer, para o caso particular de evaporação de soluções saturadas (precipitação de sais Ca CO_3), devido ao efeito do calor sensível, considerando a variação da temperatura $(\Delta T)=\text{cte}$, para $n=1$, os modelos acima mencionados se reduzem ao caso da equação de Mc Cabe e Robinson, sendo (n) um parâmetro de ajuste ao longo de (a_6, a_7) , que são valores de incremento de (n) , conduzindo então a uma curva fechada do tipo assintótica (EPSTEIN, 1981).

Por outro lado o modelo de Ruckenstein e Prieve, para deposição coloidal, descreve que quando a partícula encontra-se perto da parede, ela tem que superar diferentes forças de superfície, tais como forças atrativas, forças repulsivas e interação da força viscosa hidrodinâmica. Como resultado existe uma grande barreira de energia que pode ser representada como o equivalente à reação química de primeira ordem (K_r) , (EPSTEIN, 1981).

Nenhum dos modelos descritos na tabela (2.1), foram utilizados nesta simulação da incrustação dos líquidos da indústria

Conforme pode ser verificado na literatura, o escoamento de água tem sido o mais minuciosamente pesquisado em relação à incrustação produzida pelos líquidos, seguido dos casos do refino de petróleo. A incrustação produzida por outros líquidos é quase totalmente deixada de lado, sendo poucos também os casos sobre alimentos.

Num trabalho recente BELMAR et alii (1993) mostraram que o problema da incrustação do leite é muito severo. Ele ocorre como resultado da agregação reticular das proteínas e minerais. Para demonstrar o efeito dessas incrustações foram feitos ensaios experimentais com soluções de soro de proteínas em

trocadores de calor tubulares e utilizando como parâmetros a temperatura e o número de Reynolds. Os resultados mostraram que a superfície dos tubos e taxa média de reação controlam o mecanismo da formação do depósito.

3. MATERIAIS

Neste capítulo é analisada a composição típica dos líquidos da indústria de processamento de pescado, aves, bovino e suíno. Esses líquidos contêm principalmente proteínas e gorduras, além de outros compostos. Os valores dos líquidos foram tomados diretamente das indústrias de processamento. A partir da composição é feita estimativa das propriedades termo-físicas segundo as indicações da literatura.

3.1-Composição dos líquidos da indústria

3.1.1-Composição do líquido de pescado

O líquido de pescado é proveniente da operação de cozimento e prensagem na produção de farinha e óleo de pescado. Esse líquido é aquecido nos trocadores de calor e submetido à operação de concentração nos evaporadores. A qualidade da composição desses líquidos dependem de três fatores:

matéria prima;
tratamentos térmicos e
as condições de armazenamento.

A qualidade de matéria-prima (peixe) afeta a composição físico-química, físico-organoléptica, bioquímica e microbilógica de seus produtos e subprodutos. No caso dos líquidos de pescado, quando as condições de operação e armazenamento não são as adequadas elas favorecem as reações enzimáticas, microbiológicas e bioquímicas, sendo que a degradação é sem dúvida muito mais acelerada que nos sólidos obtidos na operação de prensagem. Dessa forma as condições de armazenamento do pescado nos tanques da fábrica por períodos longos, devido a interrupções nos equipamentos, pode afetar diretamente a qualidade e composição dos líquidos e dos produtos finais.

A quantidade dos solúveis varia com o tipo de matéria-prima e segundo o método de cozimento. A proporção de sólidos solúveis e insolúveis contidas nestes líquidos, variam de acordo com determinados limites e dependem de:

a) mudanças bacteriológicas e enzimáticas do pescado que ocorrem desde o momento em que se deposita nas embarcações, nos tanques de armazenamento das fábricas, até sua transformação em farinha (AU, 1990).

b) das condições de cozimento direta ou indireta do pescado. De maneira geral, o conteúdo de sólidos varia entre 5 a 9 %, tendo em consideração defeitos da operação de processamento e estado de conservação da matéria-prima. É importante destacar que a maior parte dos sólidos não gordurosos presentes nestes líquidos são proteínas. A composição utilizada na simulação do fenômeno da incrustação é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Composição do líquido do pescado

Fonte: Au, (1990)

Composição do líquido de pescado	
Composição	% em peso
Proteínas.....	6,00
Carboidratos.....	0,00
Sais minerais.....	1,17
Gorduras.....	2,00
Água.....	90,83
Total.....	100,00

3.1.2-Composição do líquido de frango

Nos abatedouros avícolas, as operações de escaldagem e evisceração, a preparação da carcaça e recuperação do sangue e mais a água de lavagem, produzem quantidades apreciáveis destes líquidos com altos teores de gorduras e proteínas solúveis. Também na obtenção de extratos concentrados de frango estes líquidos são processados em equipamentos de troca térmica e depois, são concentrados nos evaporadores.

A composição varia de acordo com a raça, idade e tipo de dieta administrada sendo que a porcentagem de proteínas nestes líquidos varia de 10 a 18% segundo indica YOUNG et alii (1986); estes valores foram confirmados por BONETTO, L. (1995). Esta composição é mostrada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Composição do líquido de frango

Fonte: Bonetto, (1995)

Composição do líquido de frango	
Composição	% em peso
Proteína.....	18,00
Carboidratos.....	0,00
Sais minerais.....	1,00
Gorduras.....	14,9
Água.....	65,35
Total.....	100,00

3.1.3-Composição do líquido de bovino

Esta composição, de modo geral, depende ainda da espécie e raça do animal, do sexo e da condição física no momento do abate. Existem assim, diferenças de composição dentro da mesma espécie (AMARO, 1978).

Esses líquidos são produzidos a partir do caldo de cozimento da carne, para a obtenção de extratos concentrados. Esta operação de preparar o extrato de carne consiste em recolher todo o caldo proveniente da carne cozida levando a um tanque receptor, aí é aquecido por aproximadamente 60 minutos à temperatura de ebulição seguido de posterior repouso para separação da gordura e das proteínas coaguladas

Após a separação de gorduras e proteínas o líquido é submetido a pré-aquecimento num trocador de calor e posteriormente é efetuada a operação de filtração. Uma vez filtrado o caldo é levado a um tanque receptor e depois aquecido novamente no trocador de calor, para sua posterior concentração nos evaporadores. Aí o caldo é concentrado até aproximadamente 25 % de sólidos passando a seguir por um esterilizador. O processo é descrito a fim de mostrar que o fenômeno da incrustação ocorre na operação de aquecimento nos trocadores de calor. Esta composição do líquido é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Composição do líquido de Bovino

Fonte: Amaro, (1978)

Composição do líquido de bovino	
Composição	% em peso
Proteína.....	12,00
Carboidratos.....	0,00
Sais minerais.....	1,00
Gordura.....	5,00
Água.....	82,00
Total.....	100,00

3.1.4-Composição do líquido de suíno

A composição do líquido de suíno, varia também de acordo com espécie, raça, sexo, idade, e condição física no momento de abate conforme (WIENLING 1973). Estes líquidos originam-se do água de lavagem nas operações do processamento para elaboração de produtos de salsicharia, onde são recuperadas as proteínas solúveis e gorduras. Esse caldo é submetido a um tratamento térmico nos trocadores de calor e levado para sua posterior concentração nos evaporadores. A composição é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela.3.4 Composição do líquido de suíno

Fonte: Price & Sweigert, (1971)

Composição do líquido de suíno	
Composição	% em peso
Proteína.....	6,00
Carboidratos.....	0,00
Sais minerais.....	1,00
Gorduras.....	10,00
Água.....	83,00
total.....	100,00

3.2-Propriedades termo-físicas dos líquidos da indústria

A estimativa das propriedades termo-físicas dos líquidos da indústria é fundamental nos processos e cálculos das operações que envolvem transferência de calor e de massa, como é o caso do aquecimento e concentração dos líquidos da indústria.

A transferência de calor depende das propriedades do meio como condutividade térmica, calor específico, densidade, viscosidade, coeficiente de expansão térmica, emissividade e absorvidade.

Deve-se enfatizar que as propriedades destes líquidos são escassas na literatura e a estimativa é feita por correlações empíricas, que fornecem resultados aproximados. Serão consideradas a seguir as propriedades utilizadas neste trabalho.

3.2.1-Calor específico

É necessário conhecer o valor calor específico para determinar a quantidade de energia a ser adicionada ou removida nos processos de aquecimento ou concentração de alimentos. Este valor pode dar uma indicação de energia envolvida e nos processos contínuos pode ter influência sobre as dimensões do equipamento. O calor específico de um material multicomponente é determinado pela média ponderada dos calores específicos de cada um dos seus componentes, tendo as frações de seus componentes como peso. Neste trabalho utilizou-se a equação proposta por Dagerskog & Soorenfors citado por HALLSTROM et alii (1988), num modelo que considera o conteúdo de água, de gordura e a temperatura.

$$C_p = 1,60 + 2,6C_w + 0,015C_f T \quad (3.1)$$

Onde:

C_p : calor específico (J/kg K)

C_w : conteúdo de água (fração mássica)

C_f : conteúdo de gordura (fração mássica)

T : temperatura (K)

O modelo tem sido muito usado para a estimativa de trabalhos com líquidos procedentes das operações de processamento de carne bovina, entretanto sua aplicação é aceitável para os outros líquidos de composição semelhante. Neste modelo pode ser observado que não está contida a fração da proteína. Estima-se que esta não oferece nenhuma resistência ao transporte de calor, enquanto a gordura atua como uma camada isolante à transferência de calor.

3.2.2- Densidade

A densidade é uma das mais importantes propriedades de transporte, e é amplamente usada nos cálculos de processo. Ela afeta diretamente as outras propriedades físicas do material e em muitos casos a densidade é uma variável nas equações de predição.

A maior parte dos modelos para predição da densidade são correlações empíricas e muito dos modelos teóricos são baseadas na conservação de massa. Neste trabalho, para a estimativa desta propriedade foi usada a equação de Agrawala citado por DODEJA et alii (1990), cujo modelo considera a quantidade de sólidos presentes e a temperatura do líquido.

$$\rho = 0,9861(s)^{0,045} + 0,002 \operatorname{cosech}[1,32(55 - T)] - 0,55 \times 10^3 T \quad (3.2)$$

Onde:

ρ : densidade (Kg/m³)

s : conteúdo de sólidos totais na composição do líquido (fração mássica)

T: temperatura do líquido (K)

3.2.3-Conductividade térmica

É uma propriedade física importante na modelagem, otimização e projeto de processos dos alimentos e equipamentos da indústria de alimentos (SINGH 1982). Esta propriedade de transporte é útil na análise quantitativa em qualquer processo térmico importante como secagem, esterilização, evaporação, extrusão, cozimento etc. E principalmente no dimensionamento de trocadores de calor tubulares.

Há grande disponibilidade de modelos na literatura que podem ser utilizados e aplicadas ao cálculo de sistemas com alimentos. Eles podem ser divididos em dois grandes grupos: modelos que não incluem a temperatura como uma variável e os outros que incluem a temperatura como variável independente (CUEVAS & CHERYAN, 1979).

Essa propriedade, nos alimentos não só depende da composição mas também é influenciada por um grande número de fatores como espaço vazio, forma, distribuição de tamanhos, arranjos de espaços vazios e homogeneidade. (RAO & RIZVI, 1986). Além disso, esta propriedade nos materiais alimentícios é relacionada à umidade

Neste caso foi usada a equação de BAGHE et alii (1982), que leva em conta a quantidade de água presente, a gordura e a temperatura. Uma revisão completa e detalhada dos modelos para condutividade térmica pode ser encontrada na literatura sugerida por (CUEVAS & CHERYAN, 1979).

$$K = 0,3037 - 0,454F - 0,219W + 0,306T^{0,039} \quad (3.3)$$

Onde:

K : condutividade térmica (W/kg K)

F : conteúdo da gordura (fração mássica)

W : conteúdo de água (fração mássica)

T : temperatura do líquido (K)

As equações (3.1), (3.2) e (3.3) correspondentes ao calor específico, densidade e condutividade térmica, elas não incluem a presença do componente da proteína, devido a que estes modelos levam em conta somente a variável temperatura e os outros componentes, existem outros modelos de previsão que incluem o componente da proteína como são os de (Choi e Oikos, Heldeman e Sing etc.) pero que elas não tem em consideração a variável temperatura.

3.2.4-Viscosidade

Os líquidos da indústria de processamento de animais considerados não foram caracterizados reologicamente mas é de esperar que todos eles mostrem um comportamento newtoniano, devido à sua semelhança de composição, com soluções reais. Apesar disso apresentam dependência da viscosidade com a concentração e a temperatura. Para determinar esta propriedade utilizou-se as correlações apresentadas por Einstein citado por (CANTU, 1982), em função da fração volumétrica para suspensões diluídas ($\phi < 25\%$), como segue:

$$\mu_s = \mu_L (1 + 2.5\phi) \quad (3.4)$$

E para ($\phi > 25\%$), Vand modificou a equação de Einstein para:

$$\mu_s = \mu_L (1 + 2.5\phi + 7.25\phi^2) \quad (3.5)$$

Onde:

μ_s : viscosidade da solução (Cp)

μ_L : viscosidade da água (Cp)

ϕ : conteúdo de sólidos totais (fração volumétrica)

Esta equação de Vand citado por (CANTU, 1982), ajusta-se melhor para concentrações de sólidos maiores que 0,25, como é o caso de alguns dos líquidos da indústria. A seguinte correlação, foi deduzida para a estimativa desta propriedade em função de sua temperatura, a partir das equações empíricas dadas por BIRD et alii (1960).

$$\mu = Ae^{3,8\frac{T_b}{T}} \quad (3.6)$$

Escrevendo a equação (3.6) para $\mu_1 = \mu_1(T_1)$ e $\mu_2 = \mu_2(T_2)$ obtém-se:

$$\mu_1 = e^{3,8T_b\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \times \mu_2 \quad (3.7)$$

A correlação acima demonstra, uma diminuição exponencial da viscosidade em relação à temperatura o que concorda com o comportamento observado na maioria dos líquidos, e geralmente prediz resultados com margem de 20 % de erro. Também é possível que os líquidos apresentem comportamento não-newtoniano para concentrações acima de 25 % em peso porém essa características foge ao escopo deste trabalho.

3.3-Concentração de sólidos dos líquidos

Os líquidos residuais provenientes do processamento de animais é mistura multicomponente devido ao seu conteúdo de proteínas, gorduras e sais minerais.

3.3.1-Concentração mássica

A concentração mássica do componente (i) é expressado pela seguinte relação:

$$\rho_i = \frac{M_i}{V} \quad (3.8)$$

3.3.2-Fração mássica

A fração mássica do componente (i) é expressado por:

$$w_i = \frac{\rho_i}{\rho} \quad (3.9)$$

3.3.3-Densidade da mistura

A densidade da mistura é seguinte relação:

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i \quad (3.10)$$

3.3.4-Concentração molar

A concentração molar do componente (i) é:

$$C_i = \frac{\rho_i}{M_i} \quad (3.11)$$

3.3.5-Densidade molar da mistura

É a sumatoria das concentrações molares dos componentes

$$C = \sum_{i=1}^N C_i \quad (3.12)$$

3.3.6-Fração molar

Fração molar do componente (i) é expressado como:

$$X_i = \frac{C_i}{C} \quad (3.13)$$

3.3.7-Massa molecular da mistura

O cálculo da massa molecular da mistura foi feito utilizando a equação

$$M = \sum_{i=1}^N X_i M_i \quad (3.14)$$

Onde:

X_i : fração molar do componente (i) W_i

M_i : massa molecular de (i)

W_i : fração mássica de (i)

V : volume do componente (m^3)

ρ_i : concentração mássica (kg/m^3)

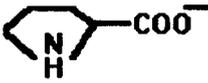
C : densidade molar da mistura (kg mol/m^3)

M : massa molecular da mistura

Com as expressões acima foram determinadas as diferentes concentrações dos líquidos da indústria. O peso molecular dos monômeros contidas nesses líquidos residuais estão apresentados na Tabela (3.5).

Tabela 3.5 Composição dos aminoácidos das proteínas

Fonte: Fennema, R. (1985)

Composição dos aminoácidos das proteínas					
Monômero	Estrutura	Bovino (P.M)	Suino (P.M)	Peixe (P.M)	Frango (P.M)
Cisteína	$\text{HS}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	-	-	121,1	121,1
Ácido aspártico	$^- \text{O}-\text{C}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	133,1	133,1	133,1	133,1
Treonina	$\text{CH}_3-\underset{\text{OH}}{\text{CH}}-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	119,1	119,1	119,1	119,1
Serina	$\text{HO}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	105,1	105,1	-	105,1
Ácido glutâmico	$^- \text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-(\text{CH}_2)_2-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	147,1	147,1	147,1	147,1
Prolina		115,1	115,1	115,1	115,1
Glicina	$\text{H}-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	75,1	75,1	75,1	75,1

Alanina	$\text{CH}_3-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	89,1	89,1	–	89,1
Valina	$\text{CH}_3-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	117,1	117,1	117,1	117,1
Metionina	$\text{CH}-\text{S}-(\text{CH}_2)_2-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	149,2	149,2	149,2	149,2
Isoleucina	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	131,2	131,2	131,2	131,2
Leucina	$\text{CH}_3-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	131,2	131,2	131,2	131,2
Triosina	$\text{HO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	181,2	181,2	181,2	182,2
Fenilalanina	$\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	165,2	165,2	165,2	165,2
Lisina	$\text{NH}_2-(\text{CH}_2)_4-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	146,2	146,2	146,2	146,2
Histidina	$\text{HN}-\text{C}_5\text{H}_3-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	155,2	155,2	155,2	155,2
Arginina	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}(=\text{NH}_2)-\text{NH}-(\text{CH}_2)_3-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	174,2	174,2	174,2	174,2
triptofano	$\text{C}_8\text{H}_6\text{N}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_3}{\text{CH}}-\text{COO}^-$	–	–	204,2	204,2

Quanto aos valores da composição de aminoácidos das proteínas de bovino, suíno e frango, elas mostraram os mesmos componentes que a proteína do peixe. No peixe, o aminoácido ausente é a alanina e está presente o triptofano com seu alto peso molecular, encontrando-se portanto diferenças mínimas em seus conteúdos de aminoácidos nos líquidos.

As proteínas solúveis são importantes pois quando submetido à operação de aquecimento, provocam a ruptura das ligações peptídicas, ocorrendo a coagulação, das proteínas. Se o processo ocorrer em longos períodos de tempo e a temperatura for elevada, provocará o processo irreversível da desnaturação das proteínas. No fenômeno da incrustação a primeira fase que acontece é adsorção sobre a superfície metálica e é governada pelo mecanismo da difusão molecular. A composição de aminoácidos solúveis (exceto para o peixe), são valores aproximados, tomados de diversas fontes. Dados específicos da composição deste líquido não estão disponíveis na literatura.

A composição dos ácidos graxos saturados e insaturados nas gorduras dos líquidos apresenta uma grande taxa de variação, conforme a tabela (3.6). Esta variação acentuada deve-se principalmente ao tipo de espécie.

A experiência industrial em processamento de fluidos alimentícios, com altos teores de gorduras, demonstram que estes desempenham um papel de menor importância nas incrustações, via adsorção de lipídios sobre superfícies.

Tabela 3.6 Composição dos ácidos graxos.

Fonte: Kramlich et alii.(1973);Jacquot (1961)

Composição dos ácidos graxos nas gorduras					
Nome (P.M)	Formula	Bovino (%)	Suíno (%)	Peixe (%)	Frango (%)
Saturados					
Palmitico 256,42	$C_{15}H_{31}COOH$	29,0	28,0	15,5	20
Estearico 284,45	$C_{17}H_{35}COOH$	20,0	13,0	15,5	20
Isovalerico 102,1	C_4H_9COOH			10,0	
Insaturados					
Palmitoleico 254,40	$C_{15}H_{29}COOH$	2,0	3,0		
Oleico 282,45	$C_{17}H_{33}COOH$	42,0	46,0	20,0	30,0
Linoleico 280,44	$C_{17}H_{31}COOH$	2,0	10,0	20,0	30,0
Linolenico 278,42	$C_{17}H_{29}COOH$	0,5	0,7		
Araquidônico 304,46	$C_{19}H_{31}COOH$	0,1	2,0		
Clupadônico 284,0	$C_{21}H_{33}COOH$			6,0	
Estereadônico 384,20	$C_{17}H_{35}COOH$			8,0	

A baixa tendência da incrustação que apresentam as gorduras, via adsorção de lipídios sobre superfícies metálicas, é devida à habilidade de alterar a energia da superfície (superfícies molhadas por líquidos de alta tensão superficial) e a transformam numa superfície autofóbica e não molhável. Para uma informação mais completa sobre o tema pode-se consultar (DETTRE & JOHNSON, 1969).

3.3.8-Volume molar

Como a difusividade é uma função do volume molar no ponto de ebulição normal, os dados são específicos para cada substância orgânica. Portanto a estimativa foi feita a partir da contribuição de grupos da estrutura química dos aminoácidos presentes na proteína dos líquidos. Estes valores da contribuição de grupos é dado por Le Bas citado por (PERRY, 1973)

Para aminas primárias (RNH₂) = 10,5 (volume atômico)

Para aminas secundárias (RNH) = 12,0

Para aminas terciárias (R₃N) = 10,8

Em união com S,P,N = 8,3

Oxigênio = 7,4

Carbono = 14,8

Hidrogênio = 3,7.

3.4.-DIFUSIVIDADE

Para a estimativa da difusividade dos líquidos utilizou-se o modelo proposto por Wilke -Chang citado por (SKELLAND, 1974)

$$D_{AB} = 7,4 \times 10^{-8} \frac{(\psi_B M_B)^{1/2} T}{\mu \bar{V}_A^{0,6}} \quad (3.15)$$

Onde:

ψ_B : parâmetro associado ao solvente água

M_B : peso molecular do solvente água

T : temperatura (K)

μ : viscosidade do líquido (kg/m s)

\bar{V}_A : volume molar do soluto a sua temperatura de ebulição

y^+ : distância adimensional a partir da parede = $u^* y / \nu$

u^* : velocidade de atrito (m/s) = $\left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{1/2}$

A difusividade turbulenta é dada por:

$$\frac{\tau}{\rho} = \varepsilon_m \frac{du}{dy} \quad (4.2)$$

Onde:

τ : tensão de cisalhamento na parede (kgf/m²)

ρ : densidade (kg/m³)

$\frac{du}{dy}$: gradiente de velocidade na direção normal à parede.

Supondo $\tau, \rho, \varepsilon_m$ constantes, da integração da:

$$u = \frac{\tau_o}{\rho \varepsilon_m} \ln y^+ \quad (4.3)$$

A expressão (4.4) é fornecido por (KAYS & CRAWFORD, 1980) para a distribuição da velocidade universal para ($y^+ > 30$), é:

$$u^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,5 \quad (4.4)$$

A tensão de cisalhamento é considerada constante e é escrita como:

$$\frac{\tau}{\tau_o} = \frac{r}{r_o} \quad (4.5)$$

Das equações (4.1), (4.3) e (4.4) obtém-se:

$$u^+ = 2,5 \ln \left[y^+ \frac{1,5(1+r/r_o)}{1+2(r/r_o)^2} \right] + 5,5 \quad (4.6)$$

A equação (4.6) é utilizada para valores de ($y^+ > 30$), é discutido e analisado por (KAYS & CRAWFORD, 1980).

4.1.2-Perfil da temperatura

A dedução geral do perfil da temperatura, a partir da equação da energia em coordenadas cilíndricas está no apêndice (A.1). Para determinar o perfil foi utilizada a equação empírica proposta por Reichardt e discutida por (KAYS & CRAWFORD, 1980). Para escoamento turbulento o perfil é dado por:

$$T = 13,2 Pr + \frac{Pr_t}{k} \ln \left[y^+ \frac{1,5(1+r/r_o)}{1+2(r/r_o)^2} \right] - 5,8 \quad (4.7)$$

Onde;

T.: perfil da temperatura

k: constante =0,4

Pr_t: número de Prandtl turbulento=0,9

Pr: número de Prandtl

r_o: raio do tubo (m)

r: posição radial (m)

y⁺: distância adimensional a partir da parede.

Neste modelo é inserido o número de Prandtl turbulento ($Pr_t = \frac{e_m}{e_H} = 0,9$) e

onde (e_m , e_H são difusividade de quantidade de movimento e difusividade térmica calor). O perfil da temperatura é quase uma constante para altos valores de Prandtl, $Pr > 300$.

4.1.3-Perfil da concentração

Foi considerada para estimativa da distribuição da concentração a equação dada por Putnam citado por (SKELLAND, 1974), para região próxima da parede, onde ocorre a deposição do material incrustante. O modelo é baseado na analogia entre a transferência de quantidade de movimento e a transferência de massa, supondo constante a tensão de cisalhamento perto da parede. A equação é a seguinte:

$$\frac{\rho_A - \rho_{AW}}{\rho_{AB} - \rho_{AW}} = \frac{\frac{14,5 \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{2/3} F\left(\frac{\mu}{\rho D} y^+\right)}{\sqrt{2} + \left\{ \frac{14,5 \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{2/3} F\left(\frac{\mu}{\rho D}\right) + 5 \ln \frac{1 + 5,64 \mu / \rho D}{6,64(1 + 0,041 \mu / \rho D)} - 4,77 \right\}}}{\quad} \quad (4.8)$$

Onde:

$$F\left(\frac{\mu}{\rho D} y^+\right) = \frac{1}{2} \ln \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{1/3} \left(\frac{y^+}{14,5}\right) \right]^2}{1 - \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{1/3} \left(\frac{y^+}{14,5}\right) + \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{2/3} \left(\frac{y^+}{14,5}\right)^2} +$$

$$+ \sqrt{3} \operatorname{tg}^{-1} \frac{\left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{1/3} (2y^+ / 14,5) - 1}{\sqrt{3}} + \frac{\pi \sqrt{3}}{6}$$

$$F\left(\frac{\mu}{\rho D}\right) = \frac{1}{2} \ln \frac{\left[1 + \frac{5}{14,5} \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{1/3}\right]^{-2}}{1 - \frac{5}{14,5} \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{1/3} + \left(\frac{5}{14,5}\right)^2 \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{2/3}} +$$

$$+\sqrt{3} \operatorname{tg}^{-1} \frac{\frac{10}{14,5} \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{1/3} - 1}{\sqrt{3}} + \frac{\pi\sqrt{3}}{6}$$

Sendo:

$(\rho_A - \rho_{AB})/(\rho_{AB} - \rho_{AW})$: perfil da concentração adimensional

μ : viscosidade dinâmica (kg/m s)

ρ : densidade (Kg/m³)

D : difusividade molecular (m²/s)

f : fator de atrito

y^+ : distância adimensional a partir da parede.

O Modelo baseado na analogia entre transferência de quantidade de movimento e a transferência de massa. O significado desta hipótese é que fornece uma condição de contorno favorável à solução da equação diferencial da quantidade de movimento. O perfil da concentração é uma função do número de Schmidt, pois para baixos números de Schmidt (como é caso dos líquidos da indústria) a resistência dominante é evidentemente convectiva, enquanto que para números altos de Schmidt a resistência dominante é difusiva.

4.1.4-Coeficiente de transferência de massa

A incrustação é um processo controlado pelos fenômenos de transferência de quantidade de movimento, calor e massa, ocorrendo a baixas taxas de

transferência de massa. Para a estimativa do coeficiente de transferência de massa utilizou-se a analogia de (CHILTON & COLBURN, 1934).

$$\frac{K_{xA}}{CV_z} \left(\frac{\mu}{\rho D_{AB}} \right)^{2/3} = \frac{h}{\rho C_p V_z} \left(\frac{C_p \mu}{K} \right)^{2/3} \quad (4.9)$$

Onde:

K_{xA} : coeficiente local de transferência de massa (kg mol/s m²)

h : coeficiente local de transferência de calor (W/m² K)

C_p : calor específico (J/kg K)

μ : viscosidade (kg/m s)

ρ : densidade (kg/m³)

K : condutividade Térmica (W/m K)

D_{AB} : difusividade binária (m²/s)

C : concentração média do líquido (kg mol/m³)

V_z : velocidade média do líquido.(m/s)

Foi desenvolvido por SANDU & LUND (1982), um procedimento numérico para a resolução das equações diferenciais, relacionando o balanço de massa com t para Z =constante, e com Z para t = constante. Num tempo t constante, o balanço de massa para um cilindro infinitesimal de comprimento dz resulta:

$$d\bar{C}_A = \frac{2\pi}{W_o C} \left[\rho k_{xA} (\bar{C}_A - C'_{Ao}) \right] R dz \quad (4.10)$$

Onde:

W_o : vazão mássica na entrada = constante

\bar{C}_A : concentração local de saturação na interface líquido-sólido (Kg mol/m³)

C : densidade molar do sistema binário (kg mol/m³)

$\bar{\rho}$: densidade média local da solução (kg/m³)

k_{xA} : coeficiente local de transferência de massa da espécie A (kg mol/s m²)

R : raio do tubo (m)

C'_{Ao} : concentração de saturação de espécie A em (kg mol/m³) dado no apêndice A.2

A única condição de contorno necessária é: $Z=0$ $\bar{C}_A = C'_{Ao}$.

Para Z constante, um balanço de massa local da espécie A num cilindro infinitesimal de comprimento dz e espessura dR num intervalo dt resulta:

$$-dR = (M_A / C \bar{\rho}_A) k_{xA} (\bar{C}_A - C'_{Ao}) dt \quad (4.11)$$

Onde:

M_A : peso molecular (kg/kg mol)

$\bar{\rho}_A$: concentração média (kg/m³)

As equações (4.10) e (4.11) são fornecidos por (Sandu & Lund), ela resulta de um balanço de massa local para um cilindro infinitesimal de comprimento dz. O parâmetro k_{xA} nas equações da acima pode ser calculado conhecendo-se os perfis de velocidade, temperatura e concentração. A correlações corespondentes se encontram nas equações (4.6), (4.7) e (4.8).

Os resultados apresentados na forma adimensional são dados pelas seguinte relações:

$$\alpha = \frac{Z_i}{Z} \quad (4.12)$$

$$\omega = \frac{\Delta R_i}{R_i} \quad (4.13)$$

$$\delta = \frac{\bar{C}_A}{C'_{Ao}} \quad (4.14)$$

$$\theta = \frac{t_i}{t} \quad (4.15)$$

Onde:

Z_i : variação do comprimento do tubo (m)

Z : comprimento do tubo (m)

ΔR_i : variação do raio do tubo (m)

R_i : raio do tubo (m)

\bar{C}_A : variação da concentração da proteína (kg mol/m³)

\bar{C}_{A0} : concentração de proteína no líquido (kg mol/m³)

t_i : variação do tempo do processo (s)

t : tempo final (s)

4.2-Transferência de calor em trocadores de calor

Troca de calor entre fluidos pode se dar basicamente de duas formas: pelo contato direto entre eles, ou através de uma parede que os separa. Isso origina dois tipos fundamentais de equipamentos que operam com troca térmica: Os trocadores de calor diretos e os indiretos. Dentro deste último tipo, encontra-se os trocadores de calor tubulares que são equipamentos onde um fluido escoava internamente e outro externamente aos tubos, com o calor sendo transferido entre eles através das paredes dos mesmos. A força motriz para transferência de calor é a diferença de temperatura entre a parede e o seio do fluido (T_1-T), e a resistência à transferência é ($1/h_A$). O coeficiente de transmissão de calor que se mede com maior facilidade é o coeficiente global.

Muitas vezes os trocadores de calor são caracterizados por meio de coeficientes globais e não pelos coeficientes particulares. A determinação dos coeficientes particulares é muito difícil, pois existem incertezas na medição das temperaturas superficiais.

4.2.1-Equações de Transferência de calor

As equações utilizadas para o cálculo de trocadores de calor dependem de uma série de fatores relativos às condições do processo, tipo de fluido, propriedades físicas e características do trocador. Neste caso para simular o fenômeno da incrustação é considerado um tubo de trocador Para o cálculo do área de troca de calor, é seguida a sequência abaixo:

- A) Condições do processo;
- B) Características do trocador;
- C) Area e coeficiente global de troca térmica;
- D) Calor trocado e diferença de temperaturas;
- E) Coeficientes individuais de troca de calor e de perda de carga.

A) Condições de processo

As condições de processo que devem ser observadas nos cálculos de trocadores tubulares são:

- A 1-Temperatura de operação;
- A 2-Propriedades físicas dos fluidos;
- A 3-Perdas de carga admissíveis;
- A 4-Fatores de incrustação;
- A 5-Escolha do modo de operação do trocador

A.1-Temperatura de operação

As temperaturas de operação são definidas de acordo com o processo. Com relação às temperaturas de saída, pode-se ter casos em que apenas uma delas esteja especificada, ou mesmo nenhuma. Na primeira situação, normalmente se determina essa temperatura de forma direta, através do balanço de energia. No segundo caso, o problema é mais complicado e deve ser utilizado um processo iterativo. No programa de simulação as temperaturas de saída e entrada são

especificadas, como a metodologia utilizada está baseada na diferença de temperaturas, a identificação das temperaturas é indicada na figura (4.1), encontra-se no item (diferença de temperaturas).

A.2-Propriedades físicas dos fluidos

As propriedades físicas dos fluidos são: Viscosidade (μ), Condutividade térmica (k), calor específico (C_p) e densidade (ρ). Estas propriedades foram estimadas a partir das correlações dadas acima (item 3.2).

A.3-As perdas de carga admissíveis

As perdas de carga admissíveis dependem do tipo de fluido. Na prática, as perdas de carga normalmente recomendadas variam entre 0,65 a 1,0 Bar para líquidos, e entre 0.13 a 0,68 Bar, (para um comprimento standard de tubo), para gases e vapores à pressões intermediárias ou altas.

A.4-Fatores de incrustação

O objetivo deste trabalho é justamente determinar os fatores de incrustação produzido pelo aquecimento dos líquidos nos trocadores de calor. Esta deposição do material produz um aumento da resistência de troca térmica e conseqüentemente diminui o coeficiente global de transferência de calor. O coeficiente global de transmissão de calor necessário para atender às condições do processo poderá ser determinado pela equação ($U = \frac{Q}{A\Delta T}$), quando a superfície A for conhecida e Q e ΔT forem calculados pelas condições de processo. Se a superfície não for conhecida U poderá ser determinado independentemente da equação de balanço pelos dois coeficientes de película, como segue:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{i0}} + \frac{R_w A_o}{A_w} + RF_o + \frac{RF_i A_o}{A_i} \quad (4.10)$$

Desprezando a resistência da parede e supondo ($A_o = A_i$) segue:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{i0}} + RF_o + RF_i \quad (4.11)$$

Separando (U) e não considerando as resistências de incrustação vem:

$$U = \frac{h_{i0} h_o}{h_{i0} + h_o} \quad (4.12)$$

Onde:

U : coeficiente global de transferência de calor ($W/m^2 K$)

h_o : coeficiente película externo ($W/m^2 K$)

h_{i0} : coeficiente película interno ($W/m^2 K$),

RF_o : resistência da incrustação externa do tubo ($m^2 K/W$)

RF_i : resistência da incrustação interna do tubo ($m^2 K/W$)

A_i : área de superfície interna do tubo (m^2)

R_w : resistência da parede por unidade de área ($m^2 K/W$)

A_o : área de superfície externa do tubo (m^2)

O valor de U obtido pela equação (4.12) é considerado como o coeficiente global limpo e designado por U_c . O coeficiente que inclui a resistência da incrustação denomina-se coeficiente global de projeto ou de operação U_d . O valor de A correspondendo a U_d fornece a base para o projeto construtivo do equipamento. A relação entre esses dois é dado por:

$$\frac{1}{U_d} = \frac{1}{U_c} + RF_o + RF_i \quad (4.13)$$

fazendo $RF_o + RF_i = Rd$ a equação (4.13) fica:

$$\frac{1}{U_d} = \frac{1}{U_c} + Rd \quad (4.14)$$

Onde:

U_d : coeficiente global de projeto (ou de operação) (W/m² k)

U_c : coeficiente global do tubo limpo (W/m² k)

Rd : fator de incrustação (m² k/W)

O fator da incrustação (Rd) é calculado a partir da equação dada por (MARNER & SUITOR, 1987):

$$\frac{Rd}{A_c} = \ln \frac{D_L/D_f}{2\pi k_f L} \quad (4.15)$$

Onde:

Rd : resistência da incrustação (m² K/W)

A_c : área de superfície limpa do tubo (m²)

D_L : diâmetro de tubo limpo (m)

D_f : diâmetro de tubo incrustado em (m)

k_f : condutividade térmica do depósito de incrustação (W/m K)

L : comprimento do tubo (m)

A.5-Escolha do modo de operação do trocador

A escolha do modo de operação do trocador de calor é definida, levando-se em conta as condições econômicas e de manutenção. De maneira geral opta-se por colocar escoando no interior de tubo o líquido a ser aquecido. O caso mais geral tem vapor condensado do lado externo , portanto a condição é de temperatura externa constante.

B) Características do trocador

Os trocadores mais utilizados para este tipo de trabalho são aqueles de casco e tubos

C) Área e coeficiente global de troca térmica

O área e o coeficiente global de troca térmica é dado ($Q = UA\Delta T$).

D) Calor trocado e diferença de temperaturas

Calor trocado

A taxa de transferência de calor no trocador corresponde à troca de calor sensível de um fluido para outro, considerando-se desprezível a perda de calor para o ambiente. É calculada por:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T_L \quad (4.16)$$

Onde:

\dot{m} : vazão mássica do fluido (kg/s)

\dot{Q} : taxa de transferência de calor (W)

C_p : calor específico do fluido (J/kg K)

ΔT : diferença de temperaturas de entrada e saída dos fluidos (K)

Diferença de temperaturas

A diferença de temperaturas a ser utilizada nestes cálculos é a média logarítmica de temperaturas (LMTD), definida por:

$$\Delta T_L = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln \frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}} \quad (4.17)$$

Onde: $\Delta T_A, \Delta T_B$ são as diferenças de temperaturas nos terminais A e B, respectivamente, dado por:

$$\Delta T_A = T_v - T_1 \quad (4.18)$$

$$\Delta T_B = T_v - T_2 \quad (4.19)$$

T_1 e T_2 são as temperaturas de entrada e de saída do fluido frio, e $T_v = \text{cte}$ é a temperatura do vapor.

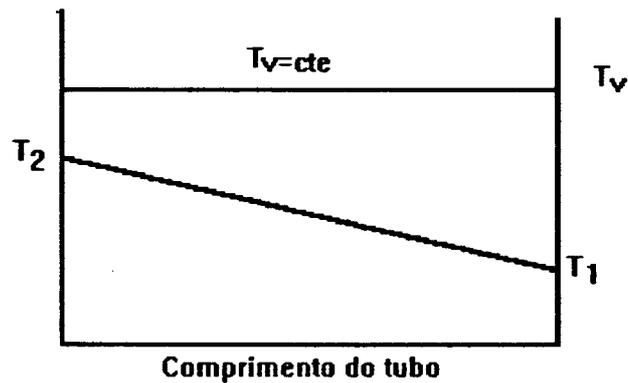


Figura 4.1 Distribuição de temperaturas no trocador

E) Coeficiente de película para fluidos em tubos

(SIDER & TATE, 1936), propuseram uma equação (4.20) para o coeficiente de película no escoamento turbulento no interior de um tubo, a partir de resultados experimentais obtidos pelo aquecimento ou resfriamento de diversos fluidos (principalmente frações de petróleo).

$$\frac{h_i D}{k} = 0,027 \left(\frac{DG}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{Cp\mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (4.20)$$

Onde:

$$\phi_t = \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad \text{é o fator de correção de Sieder \& Tate}$$

μ : viscosidade à temperatura média do fluido (kg/m s)

μ_w : viscosidade do fluido obtida na temperatura da parede do tubo (kg/m s)

G : vazão mássica do fluido (kg/s m²)

C_p : calor específico do fluido (J/kg K)

k : condutividade térmica do fluido (W/m K)

$\frac{DG}{\mu}$: número de Reynolds

$\frac{C_p \mu}{k}$: número de Prandtl

O coeficiente de película pode ser apresentado sob a forma de um fator (J_h), conhecido como fator Colburn, para calor é:

$$J_h = \left(\frac{h_i D}{k} \right) \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{-1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{-0,14} \quad (4.21)$$

Como o coeficiente de película para tubos é definido em relação ao diâmetro interno dos mesmos, ele será corrigido, para levar em conta o diâmetro externo dos tubos.

$$h_{i_o} = h_i \frac{D_i}{D_o} \quad (4.22)$$

Onde:

D_i : diâmetro interno do tubo (m)

D_o : diâmetro externo do tubo (m)

h_{i_o} : coeficiente de película interno (w/m² k)

h_o : coeficiente de película externo (w/m² k)

5. ANÁLISE E SIMULAÇÃO DO FENÔMENO DA INCRUSTAÇÃO

5.1-Dinâmica das incrustações

Os resultados experimentais reportados na literatura mostram que esse é um processo de deposição que ocorre a baixas taxas de transferência de massa.

O desenvolvimento de modelos que descrevem a incrustação sobre superfícies de transferência de calor é primordialmente baseado na analogia de transporte de quantidade de movimento, calor e massa. Os modelos disponíveis são para geometrias de tubos circulares, como acontece no processo de aquecimento ou concentração de líquidos da indústria de processamento de animais. Considere-se um tubo de raio interno R_0 e comprimento L , por onde entra um fluido a uma temperatura T_1 e vazão mássica \dot{m} . Usando coordenadas cilíndricas como é mostrado na figura 5.1, define-se a coordenada da interface líquido-sólido R onde $R=f(z,t)$. Uma vez que o processo de deposição ocorre a baixas taxas de transferência de massa, supõe-se que o incremento total na função R seja igual à soma dos incrementos parciais de R em relação a t , se z é mantido constante e de R em relação a z , se t é mantido constante.

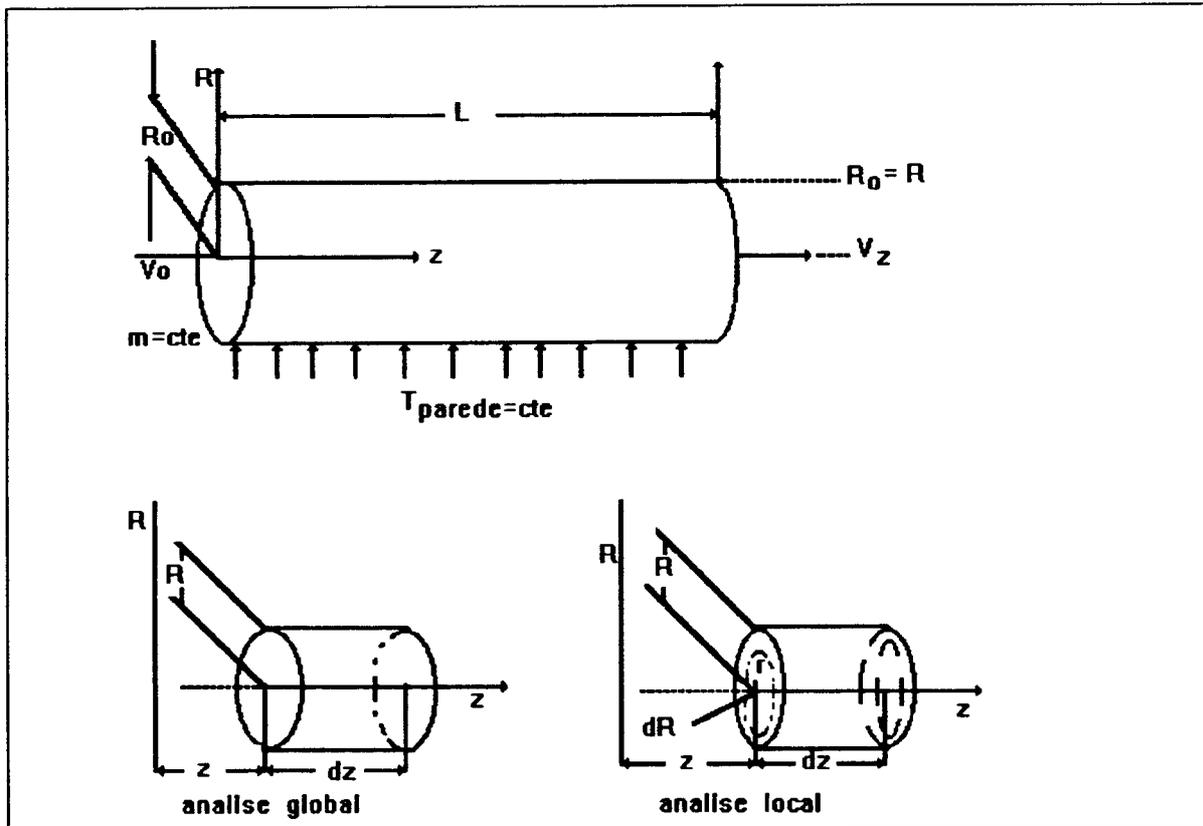


figura 5.1 Análise da incrustação num tubo circular

5.2-Formulação do modelo matemático

O modelo matemático para descrever a incrustação dinâmica, baseia-se nos balanços de transferência de calor e massa para um sistema de geometria cilíndrica. A analogia de transporte de quantidade de movimento, calor e massa é utilizada e o modelo é simplificado pelas seguintes considerações:

- o fluido é um sistema binário da proteína (espécie A) e líquido da indústria (espécie b), onde apenas a espécie A pode incrustar;
- a deposição da proteína é um processo a baixas taxas de transferência de massa;
- não há produção da espécie A no processo;

- d) a um dado tempo t constante e a $Z=0$ (na entrada da seção transversal), o escoamento apresenta um perfil de velocidade desenvolvido, para uma vazão mássica $G=\text{constante}$;
- e) o escoamento é turbulento incompressível com propriedades físicas constantes;
- h) desprezam-se os processos de remoção do material incrustado;
- i) considera-se a temperatura constante na parede do tubo.

São consideradas constantes as propriedades físicas na formulação das equações diferenciais e na sua integração e portanto calculadas para cada d_z e d_t no valor da temperatura.

5.2.1- Algoritmo do processo da incrustação dinâmica

A simulação permite estudar situações tais como a incrustação dinâmica, na qual diversas variáveis alteram-se com o decorrer do tempo de operação. Essas variáveis, que mudam com o tempo são relacionadas às restantes variáveis do processo da incrustação, através do algoritmo descrito na figura (5.2). Este algoritmo foi desenvolvido por (SANDU & LUND 1982).

A solução geral da incrustação dinâmica, só é possível por um procedimento numérico como é mostrado na figura (5.2). A suposição é feita quando a deposição não tem uma dependência angular, só depende de (t) e (z) .

O desenvolvimento do algoritmo inicia-se quando se fornece os dados de entrada como é indicado no apêndice A.3, logo depois são estimadas as propriedades termo-físicas dos líquidos com os modelos correspondentes. Primeiro foi calculado o perfil da velocidade para conhecer a velocidade média do fluido, logo estima-se um valor para encontrar o coeficiente de transferência de calor convectivo por um procedimento iterativo. Posteriormente os valores destas propriedades são inseridas para calcular os números de Prandtl e Schmidt que por sua vez são utilizados para estimar os perfis de temperatura e concentração na região próxima a

interface, estes modelos dos perfis foram baseados em ensaios experimentais e propostas por (REICHARDT, 1951).

Uma vez determinado o coeficiente de transferência de massa. O seguinte fase da simulação da incrustação é resolvida para condições transitorias (locais). Quando ocorrem as variações da concentração média, temperatura média e a variação da coordenada da interface líquido-sólido de um ponto (i) até um ponto (i+1), quando (t)= cte. A concentração de saturação da proteína é calculada segundo o modelo dado no apêndice A.2, para todos os líquidos, este modelo fornece um resulta do aproximado já que dados específicos para cada tipo de proteína não estão disponíveis na literatura.

O desenvolvimento da simulação finaliza quando é completada a matriz (t) com os dados fornecidos pelo programa computacional.

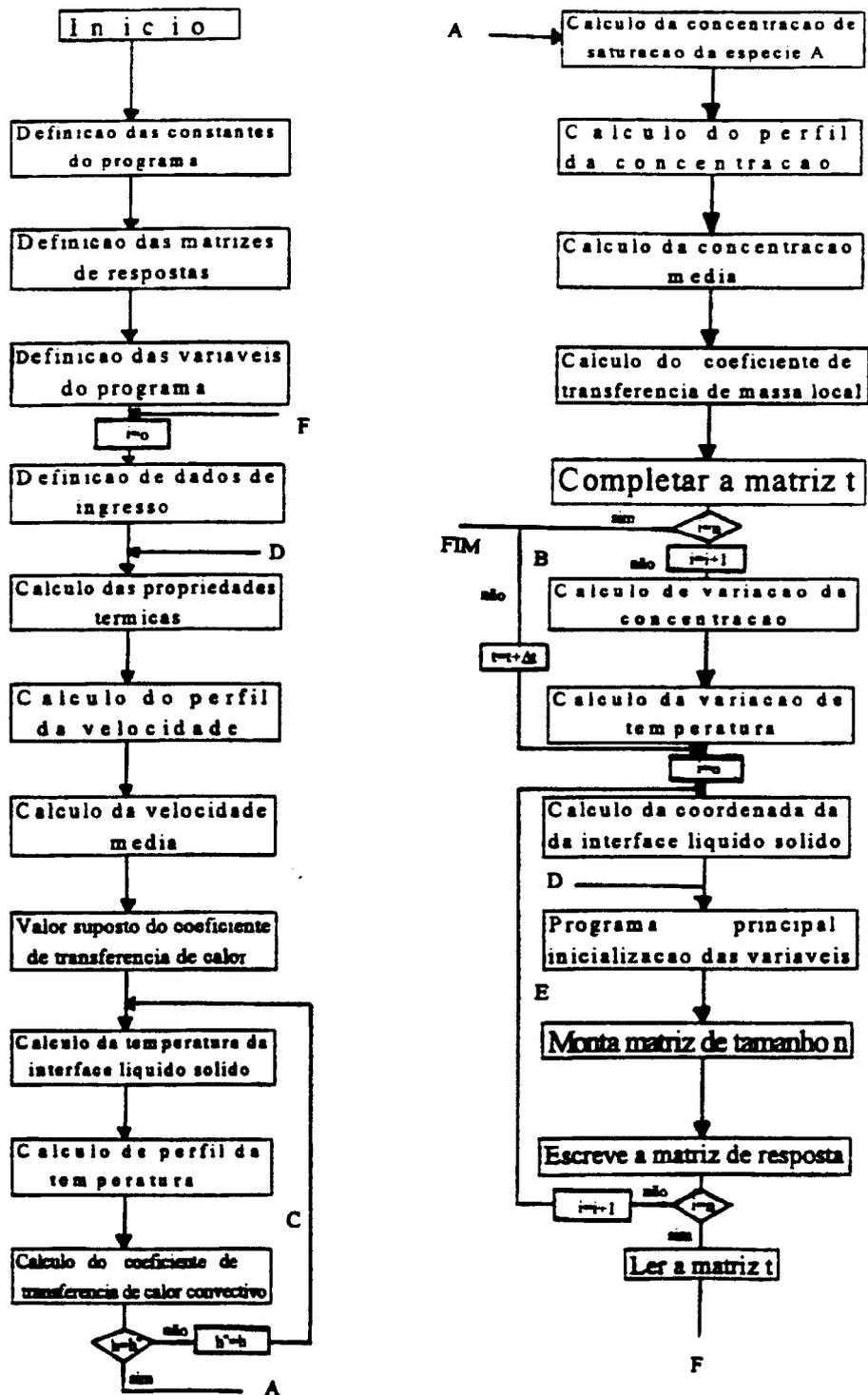


Figura 5.2 Diagrama de fluxo do algoritmo da incrustação

5.2.2-Algoritmo da simulação da incrustação

O programa Fouling simula o processo da incrustação dinâmica. O diagrama de fluxo da figura (5.3), descreve as etapas desse processo. Esta simulação só é possível mediante um procedimento de solução numérica. Ela se inicia com $t=0$, quando a superfície é limpa e finaliza num valor limite de R da coordenada da interface líquido-sólido. Em princípio tem-se o aquecimento do líquido desde a temperatura inicial até o ponto da temperatura final da operação. Neste caso calcula-se o coeficiente de transferência de calor local por convecção, por meio de um procedimento iterativo. São introduzidas subrotinas para encontrar os perfis da velocidade, temperatura e concentração. Uma vez conhecidos os perfis na região próxima à interface o coeficiente de transferência de massa é estimado. O problema é resolvido para as condições locais, ponto i , quando $t=cte$ utilizando-se as equações da variação da concentração da espécie (A), da variação da temperatura e da variação da coordenada da interface líquido-sólido.

O programa computacional foi desenvolvido em linguagem Pascal, as listagens dos programas e seus resultados encontram-se nos Apêndices: Os dados das constantes e variáveis do programa como as condições iniciais encontram-se no Apêndice A 3.

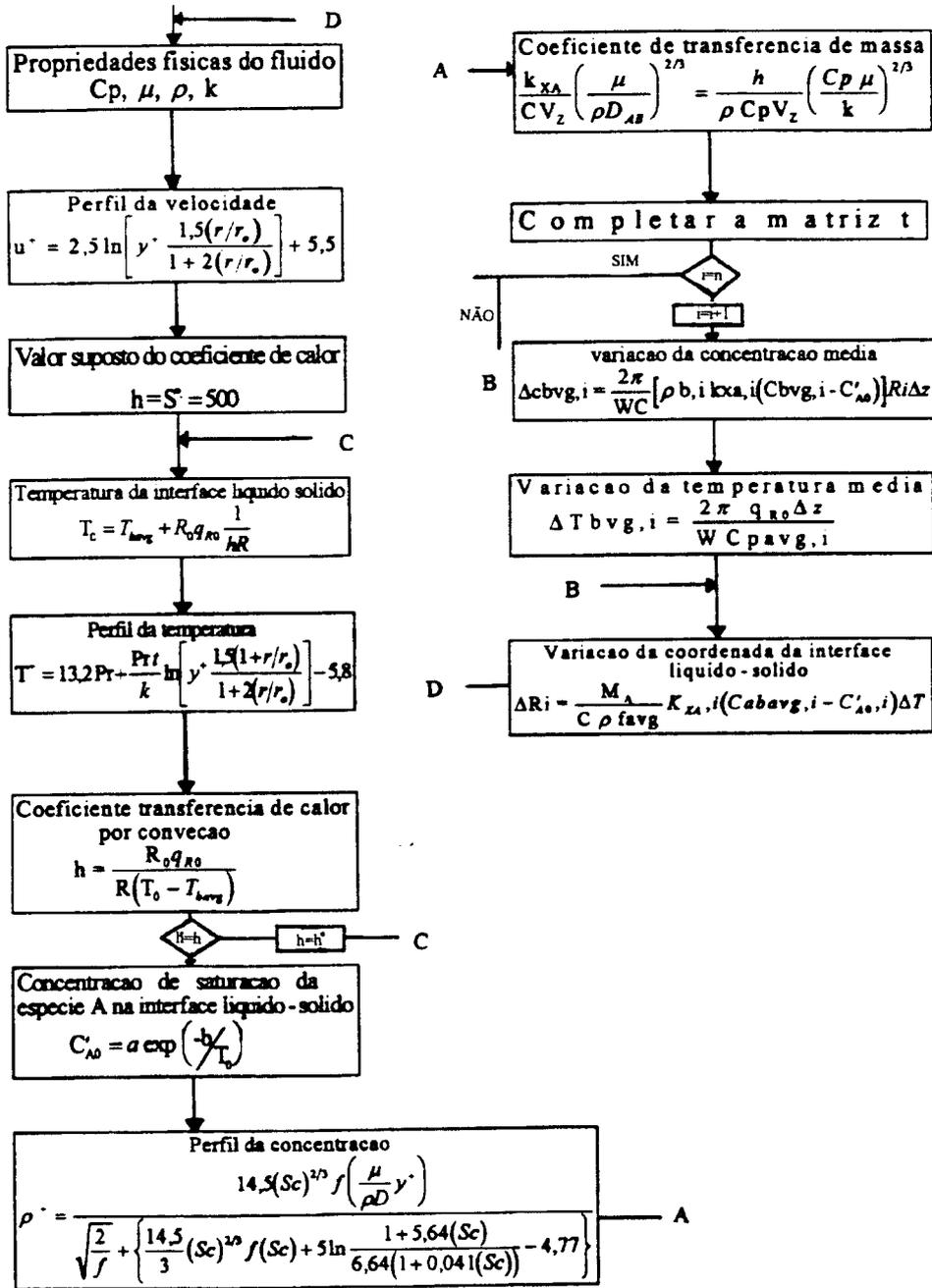


Figura 5.3 Algoritmo do processo dinâmico da incrustação

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1-Viscosidade dos líquidos

A propriedade física que têm influência durante o processo dinâmico da incrustação é a viscosidade. A tabela (6.1), apresenta os resultados calculados da variação da viscosidade dos líquidos de processo em função da temperatura. Pode-se observar que, a medida que a temperatura aumenta a viscosidade do líquido diminui pela que a transferência de massa é afetado diretamente, favorecendo a difusão molecular da espécie A (proteína).

Tabela 6.1 Variação da viscosidade com a temperatura

Temperatura (K)	Viscosidade 10^{-3} (kg/m s)			
	Bovino	Suíno	Frango	Peixe
298	0,774	0,686	1,07	0,516
310	0,643	0,570	0,890	0,429
320	0,558	0,494	0,771	0,370
350	0,381	0,338	0,527	0,254
400	0,230	0,203	0,318	0,153
450	0,155	0,137	0,214	0,103

A relação (3.7), que se obtém para calcular a viscosidade dos líquidos, em função da temperatura é a seguinte:

$$\mu_1 = e^{3,8T_b \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \times \mu_2$$

Analisando esta equação nota-se o grande efeito da temperatura na viscosidade dos líquidos, o que vai influenciar diretamente os resultados da estimativa do número de Schmidt e nas outras propriedades termo-físicas dos líquidos

Outra variável que afeta a taxa de deposição da espécie incrustante (proteína), é a difusividade, ela quando aumenta favorece na velocidade de transferência de massa da espécie incrustante, está variável a sua vez é uma função da temperatura e viscosidade.

6.2-Simulação do processo

O método de análise por simulação permite estudar o desenvolvimento do processo dinâmico da incrustação.

Os resultados da simulação indicam que a diminuição da viscosidade, quando aumenta a temperatura da interface líquido-sólido influi diretamente sobre a velocidade da difusão molecular da espécie incrustante (proteína), pois o progresso do processo da deposição durante o aquecimento do líquido sob condições transitórias é controlado pela taxa de transferência de massa.

A aplicação do modelo aqui apresentado para simulação dinâmica, permite calcular a mudança da temperatura da interface líquido-sólido, quando a concentração da espécie (proteína) na solução varia de um ponto i ao ponto $i + 1$. É importante conhecer essa temperatura, porque ela afeta diretamente a taxa de difusão molecular da espécie incrustante.

Na figura (6.1), pode-se observar a grande influência da difusividade na taxa de deposição. A tendência que apresentam os líquidos de frango e peixe são lineares, mas os líquidos de bovino e suíno não são lineares, a redução mais acentuada é a que corresponde ao líquido de bovino seguida do suíno, e frango, sendo a taxa de deposição em valores relativos de 9x, 3x e 1,5x aquela para líquido do peixe.

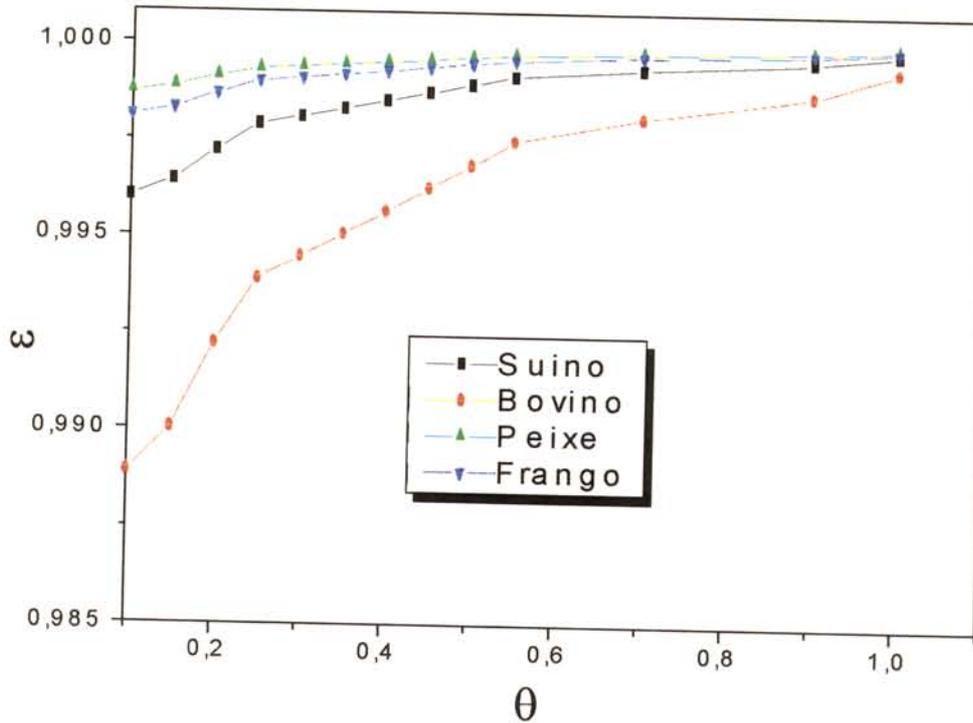


Figura 6.1 Redução do diâmetro do tubo (ω), em função tempo (θ)

Na figura (6,2), pode-se observar também que as reduções no diâmetro são todas lineares para os diversos líquidos, sendo que para o líquido do bovino a redução é mais acentuada, seguida do suíno e frango, o que é comprovado pelas inclinações negativas das retas resultantes.

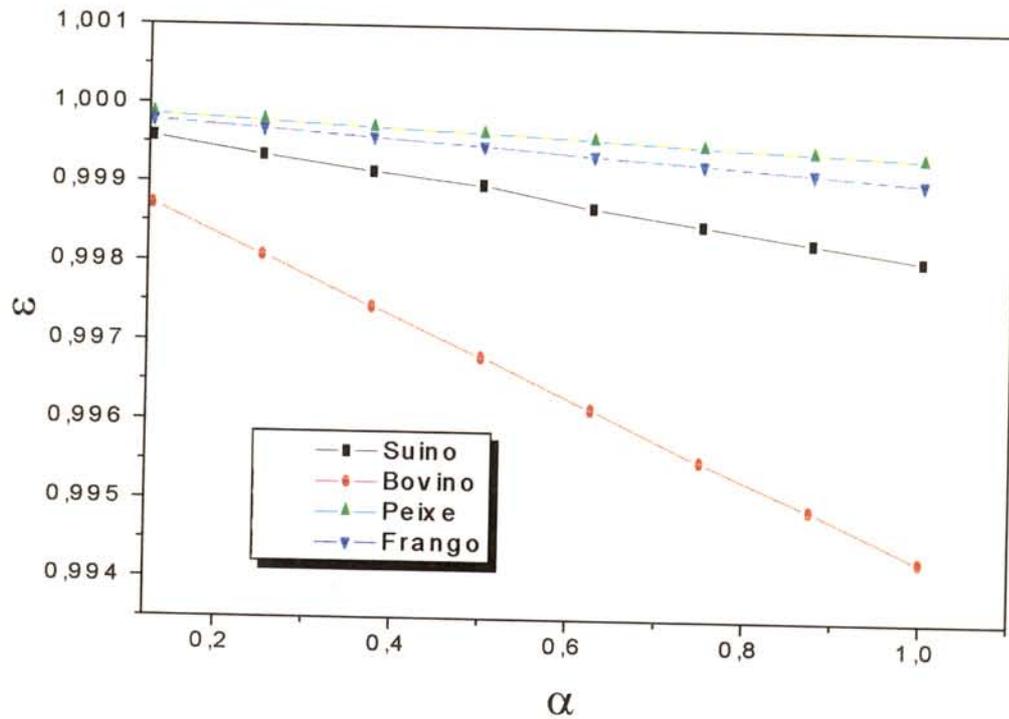


Figura 6.2 Redução do diâmetro do tubo (ω) em função do comprimento (α)

Na figura (6.3), pode se observar que a redução da concentração é linear para todos os líquidos, sendo para o líquido do bovino a variação mais forte, seguida do suíno, frango e peixe.

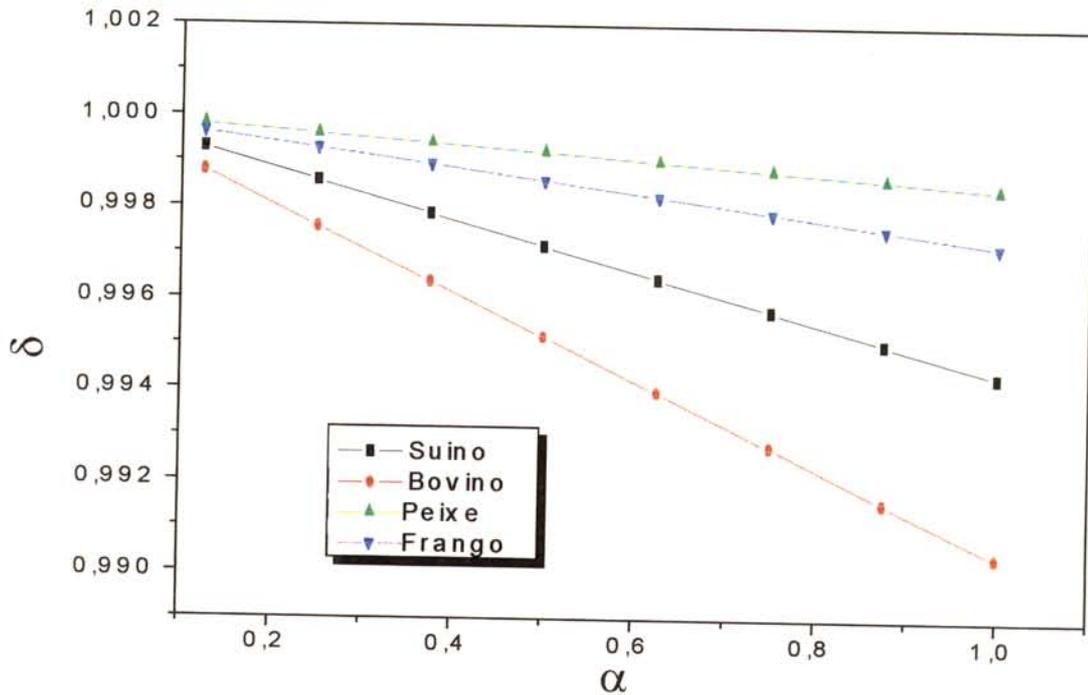


Figura 6.3 Redução da concentração (δ), em função do comprimento (α)

6.3-Efeito da resistência da incrustação

Para determinar a espessura da camada da incrustação supõe-se que essa camada é uma resistência térmica cilíndrica e essa resistência da incrustação na parede do tubo é calculado pela seguinte relação:

$$\frac{R_f}{A_c} = \frac{\ln(d_c/d_f)}{2\pi k_f L} \quad (6.1)$$

Analisando esta equação logarítmica, nota-se, que a variável que influi em maior grau é o diâmetro incrustado (d_f) e os resultados deste efeito sobre o coeficiente operacional de transferência de calor, U_f , está mostrado nas figuras (6.4) a (6.7).

A Figura (6.4), coeficiente operacional em função do coeficiente limpo, correspondente ao líquido Bovino e mostra um comportamento linear para os diversos valores da resistência da incrustação. Nota-se que para maiores valores R_f

a diminuição do coeficiente operacional é também maior. Neste caso a diminuição do coeficiente operacional atinge 23 %.

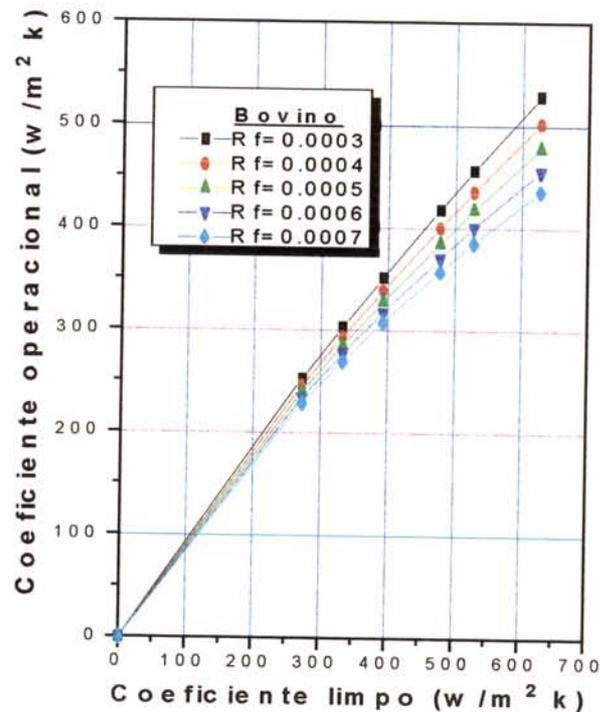


Figura 6.4 Coeficiente operacional versus coeficiente limpo

A figura (6,5), coeficiente operacional em função do coeficiente limpo, correspondente ao líquido Suíno e mostra igualmente uma tendência linear para os diversos valores da resistência da incrustação. Para valores altos de R_f corresponde uma maior diminuição do coeficiente operacional. A diminuição do coeficiente operacional atinge um valor de 23 %, como no caso do líquido de bovino.

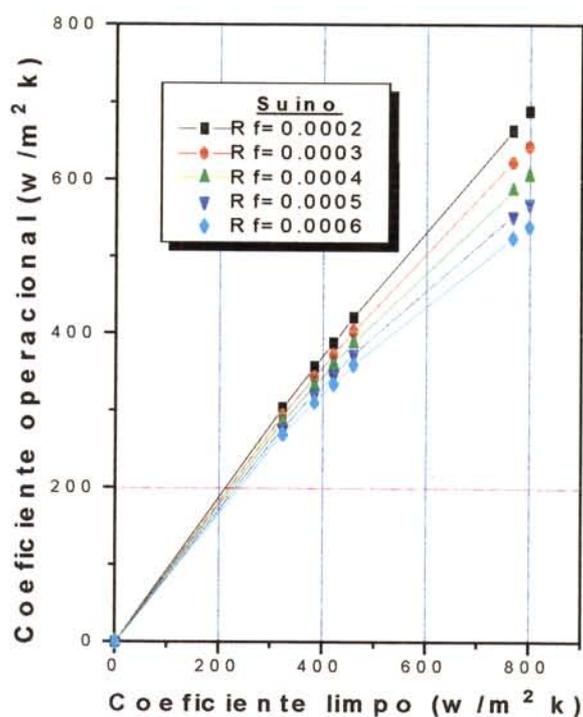


Figura 6.5 Coeficiente operacional versus coeficiente limpo

A figura (6,6), correspondente ao líquido de Frango apresenta, igualmente, uma tendência linear para os diversos valores da resistência da incrustação. Neste caso a variação do coeficiente operacional atinge um 13%, como nos casos anteriores.

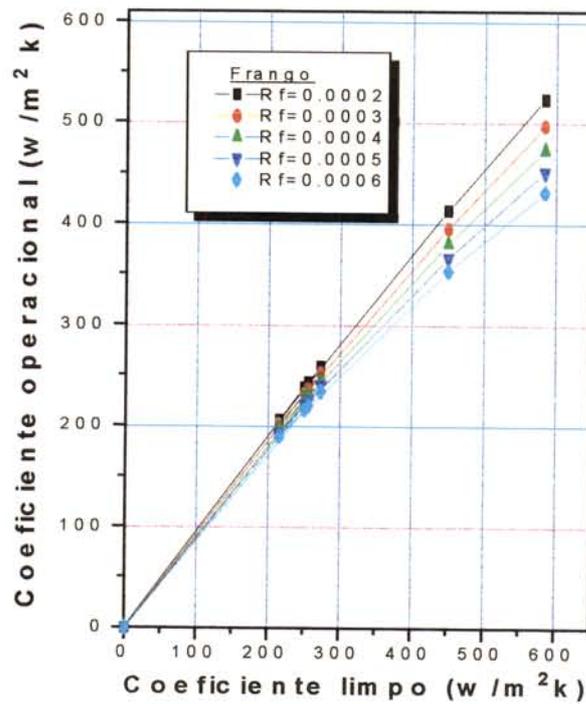


Figura 6.6 Coeficiente operacional versus coeficiente limpo

A figura (6,7), correspondente ao Líquido de Peixe e apresenta igualmente uma tendência linear para os diversos valores da resistência da incrustação. Ela é também diretamente proporcional à diminuição do coeficiente operacional. Neste caso a diminuição do coeficiente operacional atinge um valor de 27 %, portanto ligeiramente maior que os anteriores.

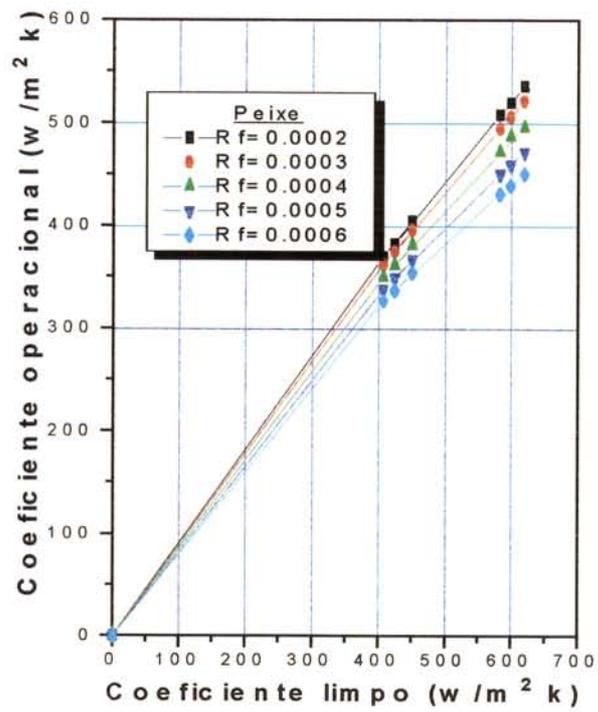


Figura 6.7 Coeficiente operacional versus coeficiente limpo

7. CONCLUSÕES

Do trabalho realizado pode-se chegar às seguintes conclusões:

1) Os resultados do modelo matemático formulado para simular o processo dinâmico da incrustação dos líquidos residuais da indústria, demonstram a aplicabilidade do algoritmo em prever a deposição da proteína nas condições de processo, sendo que para isso é necessário conhecer as propriedades físicas e composição desses líquidos. É importante lembrar que na literatura não há qualquer resultado como os reportados neste trabalho.

2) Dos quatro líquidos residuais da indústria, estudados (Bovino, Suíno, Frango e Peixe), o que apresenta a maior taxa de deposição em um tempo menor é o Bovino, seguido de Suíno, Frango e Peixe. Esta variação deve-se principalmente à influência de duas variáveis: a densidade e a concentração molar (densidade molar) de cada líquido.

3) O efeito da resistência da incrustação sobre o coeficiente operacional de transferência de calor, mostra uma diminuição maior para o líquido de peixe (27 %), seguida dos líquidos de Bovino e de Suíno (23 %) e do líquido do Frango (13 %).

8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Podem-se fazer as seguintes sugestões:

- 1) Estudar e determinar o comportamento das curvas da solubilidade das proteínas dos líquidos da indústria a fim de ter dados mais confiáveis.
- 2) Não existem dados na literatura para as propriedades termo-físicas dos líquidos da indústria, especialmente sob diversas e amplas condições de operação. Seria interessante um levantamento dessas condições para os diversos tipos de processo e determinar as propriedades correspondentes.
- 3) Ampliar o modelo matemático proposto para a simulação do desempenho de evaporadores, onde os tubos, geralmente, não trabalham cheios.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALIAS, CH. & LINDEN, G. Food Biochemistry. New York: Ellis Horwood, 1991. 219 p.
2. AMARO, R.F. Tecnología dos produtos cárneos. Centro de tecnologia de carnes. Campinas: ITAL, 1978. 138p.
3. AU, D.N. Apostila Tecnología de Harina y Aceite de Pescado. UNICA Perú: 1990. 63p.
4. Anonymous. International Financial Statistics. 1979.
5. BAGHE, M.S.; OKOS, M.R.; SWEAT, V.E. The thermal conductivity of beef as affect by temperature and composition. Trans American Society of Agricultural Engineering, p 1118-1122, 1982.
6. BELMAR, M.T.; GOTHAM, S.M.; PATERSON, W.R.; PRITCHARD, A.M. The effect of Reynolds number and fluids temperature in whey protein fouling. Journal Food Engineering, 19(2): 119-139, 1993.
7. BIRD, B.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, N.E. -Transport Phenomena. New York: John Willey & Sons.Inc, 1960. 769 p.
8. BONETTO, L. Comunicação Pessoal, Dados da composição do frango. Pena Branca-Jaguariúna, SP. 1995.
9. BURFOOT, D. & STEPHEN, J.J. -The effect of spatial variation of heat transfer coefficient on meat processing times. Journal Food Engineering, 7(1):41-61, 1988.
10. CANTU, L.D. Estudo da caracterização das propriedades reológicas de caldos de fermentação. Campinas, 1982 74p Tese (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
11. CUEVAS, R. & CHERYAN, M. Thermal conductivity of liquids foods. J of Food Process Engineering, 2(4): 283-306, 1979.

12. CHILTON, T.H. & COLBURN, A.P. Mass Transfer (Adsorption) Coefficients. Industrial And Engineering Chemistry 26 (11): 1183-1187, 1934.
13. DETTRE, R.H. & JHONSON, R.E. Wettability and contact angles. In: Matejevic, E. Ed. Surface and Colloid Science. USA: John Wiley & Sons, Inc, 1969. V 2, 298p.
14. DODEJA, A.K.; SARMA, S.C.; ABICHANDANI, H. Heat transfer during evaporation of milk to high solids in thin film scraped. J of Food Process Engineering, 12(3): 211-225, 1990.
15. EPSTEIN, N. Fouling in Heat Transfer In: Somercales E.F. & Knudsen, J.G Ed. Fouling of Heat Transfer. USA: Hemisphere Publishing, 1981. p.701-743.
16. FENNEMA, R.O. Food Chemistry. 2.ed. New York: Marcel Dekker, 1985 689p.
17. GREEN, A.A. & HUGHES, W.L. Protein fractionation on basis of solubility in aqueous solution of salts and organic solvents. In: Colowick Ed. Methods in enzimology New York: Academic Press, 1955. p.67-138.
18. HALLASTROM, B.; KJOLDEBRAND, CH.S.; TRAGARDH, CH. Heat Transfer and Food Products. Great Britain: Elsevier Applied Science, 1988. 255p.
19. JACQUOT, R. Organic constituents of fish and other aquatic animal food. In: Borgstrom, G. Ed. Fish as Food. New York: Academic Press, 1961. v 1, P 145-192.
20. KERN, Q.D. Processos de Transmissão de Calor; Trad. de Adir. M. Luiz.. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1980. 667p.
21. KRAMLICH, W.E.; PEARSON, A.M.; TAUBER, F.W. Processed Meats. Connecticut: The Avi publishing, 1973. 343p.
22. KAYS, V.M. & CRAWFORD, M.E. Convective Head and Mass Transfer. 2.ed. New York:: Mc. Graw Hill company, 1980. 411p.

23. KERN, D.Q. & SEATON, R.E. A theoretical analysis of thermal surface fouling. British Chemical Engineering, 4:258-262, 1959.
24. LANGE, D.A. & LARANJA, D.E. Tecnologia de carne bovina e produtos derivados. Campinas: Fundação Tropical de pesquisa e tecnologia-FTPT, 1983. 440p.
25. LIMA, H.V.M. -Análise de transferência de calor da evaporação a vácuo da pasta de tomate mediante a simulação por computador. Campinas, 1976. 77p. Tese (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade de Estadual de Campinas.
26. MARNER, W.J. & SUITOR, J.W. Fouling with convective Heat Transfer In: KAKAÇ, S. Ed. Handbook of single-phase convective heat transfer. USA: John Wiley & Sons.Inc, 1987. cap. 21.
27. MILES, C.A.; BEEK, G.V.; VEERKAMP, C.H. Calculation of thermophysical properties of food. IN Jowitt, R. Ed. Physical properties of food. London: Applied science, 1983. p.
28. MOUNTNEY, G.J. Poultry Products Technology. 3.ed. USA: The Avi publishing, 1974. 261p.
29. PERRY, R.H. & CHILTON, C.H. Chemical Engineering Handbook. 5.ed USA: Mc Graw Hill, 1973. cap.25.
30. PEARSON, A.M. & DUTSON, T.R. -Edible meat by products. In: Elsevier applied science. Ed. Advances in meat research. Great Britain, 1988. V 1, p220.
31. PRICE, J.F. & SCHWEIGERT, B.S. The Science of meat and meat products. 2.ed. San Fransisco: Freeman, W.H, 1971. 664p.
32. PIBOUL, M. -Técnicas e processos para conservação de carnes e tecnologia de derivados carneos. Fundação centro tropical de pesquisa e tecnologia de alimentos Campinas: FTA-UNICAMP, 1973. 335p.
33. RAO, M.A. & RIZVI, S.S.H. Engineering properties of food.. New york: Marcel Dekker.Inc, 1986. 331p.

34. REICHARDT, V.H. Die grundlagen des turbulenten warmeu berganges. Arch. Ges Warmetechn.2: 129-141, 1951.
35. SIEDER, E.N. & TATE, C.E.. Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes. Industrial and Engineering chemistry, 28 (12): 1429-1435, 1936.
36. SANDU, C. & LUND, D. Food Process Engineering, 78(218): 12-30, 1982.
37. SKELLAND, A.H. Diffusional Mass Transfer. USA: John Wiley & Sons. Inc, 1974. 449 p.
38. SINGH, R.P. Thermal diffusivity in food processing. Food Technology, 36 (2): 87-91, 1982.
39. THACKERY, P.A. The cost of fouling in Heat Exchange plant. In: Proceedings of the conference Fouling-science or Art. Guilford England, 1979. p27-28.
40. WEINLING, H. Tecnología práctica de la carne. Zaragoza: Acribia, 1973. 735p.
41. WANG, N.Q. & BRENNAN, J.G. Thermal conductivity of potato as a function of moisture content. Journal of Food Engineering, 17(2): 153-160, 1992.
42. WELTY, J.R.; WICKS, CH.E.; WILSON, R.E. Fundamentals of momentum heat and mass transfer. Singapore: John wiley & Sons. Inc. 1984. 797 p.
43. WATKINSON, A.P. Fouling of augment heat transfer tubes. Heat Transfer Engineering, 11 (3): 57-65, 1990.
44. YOUNG, L.L.; ANG, W.Y.; SEARCH, G.K.; HAMM, D. Content of select protein component In: Poultry bone residue. Champaing, 1986. p1214-1216.

10 APÊNDICE

Apêndice A.1-DEDUÇÃO DO PERFIL DA TEMPERATURA

A dedução é a partir da equação de energia em coordenadas cilíndricas, desprezando o aquecimento assimétrico ($\frac{\partial T}{\partial \phi} = 0$), e condução axial ($\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$) e fica:

$$u\rho c \frac{\partial T}{\partial x} + V_r \rho c \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (1)$$

Restringindo a equação (1), para o caso de propriedades constantes do fluido tem-se:

$$\bar{u} \frac{\partial T}{\partial x} + \bar{V}_r \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(\alpha - \varepsilon_H) \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right] = 0 \quad (2)$$

Onde:

$$t'v' = -\varepsilon_H \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2a)$$

Portanto para um fluxo plenamente desenvolvido ($\bar{V}_r = 0$, \bar{u}) é uma função só de (r) e a equação (2) se reduz:

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(\alpha + \varepsilon_H) \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right] = \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \quad (3)$$

Onde:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = \frac{dT_o}{dx} = \frac{dT_m}{dx} \quad (3a)$$

Substituindo a equação (3a) na equação (3), fica:

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(\alpha + \varepsilon_H) \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right] = \bar{u} \frac{dT_m}{dx} \quad (4)$$

Tomando a variável independente ($y = r_o - r$), e substituindo na equação (4) tem-se:

$$-\frac{1}{r_o - y} \frac{\partial}{\partial y} \left[(r_o - y)(\alpha + \varepsilon_H) \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right] = \bar{u} \frac{dT_m}{dx} \quad (5)$$

Onde as condições de contorno são:

$$\bar{t} = t_o \text{ a } y = 0; \quad \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = 0; \quad y = r_o$$

Integrando a equação (5), obtém-se:

$$(r_o - y)(\alpha - \varepsilon_H) \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = \frac{dT_m}{dx} \int_0^y \bar{u}(r_o - y) dy + C_1 \quad (6)$$

Fazendo ($\bar{u} = V$) uma constante e inserindo na equação (6), tem-se:

$$(r_o - y)(\alpha - \varepsilon_H) \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = \frac{dT_m}{dx} V \left(r_o y - \frac{y^2}{2} \right) + C_1 \quad (6)$$

Aplicando a segunda condição tem-se:

$$C_1 = \frac{dT_m}{dx} V \left(r_o^2 - \frac{r_o^2}{2} \right) \quad (6a)$$

Substituindo (6a) em (6) e resolvendo a derivada tem-se:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial y} = \frac{dT_m}{dx} \frac{V}{2} \left(\frac{r_o - y}{\alpha - \varepsilon_H} \right) \quad (7)$$

Integrando, rearranjando e deslocando (t) na equação (7) obtém-se:

$$\bar{T} = \frac{-r_o V}{2} \frac{dT_m}{dx} \int_0^y \frac{1-y/r_o}{\alpha + \varepsilon_H} dy + C_2 \quad (7a)$$

$$q_o'' = \frac{r_o V \rho c}{2} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \quad (7b)$$

Expressando $\left(\frac{dT_m}{dx} \right)$ em termos de (q_o'') fluxo de calor, usando a equação (7b) e tomando (q_o'') como positivo então fica:

$$\bar{t} = \frac{q_o''}{\rho c} \int_0^y \frac{1-y/r_o}{\alpha + \varepsilon_H} dy + C_2 \quad (8)$$

Aplicando a primeira condição de contorno, a integral tende a zero e $c_2 = t_o$:

$$T - T_o = \frac{q_o''}{\rho c} \int_0^y \frac{1-y/r_o}{\alpha + \varepsilon_H} dy + \quad (9)$$

Agora inserindo (y^+) como variável independente e também (α) substituindo na equação (9) tem-se:

$$y^+ = \frac{\sqrt{\tau_o/\rho}}{\nu} \quad \alpha = \nu/\text{Pr}$$

$$T - T_o = \frac{q_o''}{\rho c} \frac{1}{\sqrt{\tau_o/\rho}} \int_0^y \frac{1-y/r_o}{1/\text{Pr} + \varepsilon_H/\nu} dy^+ \quad (10)$$

Substituindo (t^+) , na equação (10), portanto fica:

$$T^+ = \frac{(T_0 - T) \sqrt{\tau_0 / \rho}}{q_0'' / \rho c}$$

$$T^+ = \int_0^{y^+} \frac{1 - y/r_0}{1/\text{Pr} + \varepsilon_H/v} dy^+ \quad (11)$$

Quando ($y^+ = 13,2$), integrando a equação (11) por partes tem-se:

$$T^+ = \int_0^{13,2} \text{Pr} dy^+ \int_0^{y^+} \frac{1 - y/r_0}{\varepsilon_H/v} dy^+ \quad (11)$$

Onde: $\frac{y}{r_0} = 0$; $\frac{\varepsilon_H}{v} = k y^+$

$$T^+ = 13,2 \text{Pr} + \int_0^{y^+} \frac{1 - y/r_0}{k y^+} dy^+ \quad (12a)$$

$$T^+ = \int_0^{13,2} \frac{dy}{1/\text{Pr} + \varepsilon_H/v} \int_{13,2}^{y^+} \frac{dy^+}{1/\text{Pr} + \varepsilon_H/v} \quad (12b)$$

Desprezando ($\frac{\varepsilon_H}{v} = 0$) inserindo ($\text{Pr} t = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_H}$), e integrando na equação (11b) fica:

$$T^+ = 13,2 \text{Pr} + \int_{13,2}^{y^+} \frac{\text{Pr} t dy}{k y^+} \quad (12c)$$

Logo integrando e resolvendo a equação (12c) tem-se:

$$T = 13,2 \text{Pr} + \frac{\text{Pr}_t}{k} \ln \frac{y^+}{13,2} \quad (12d)$$

7. CONCLUSÕES

Do trabalho realizado pode-se chegar às seguintes conclusões:

1) Os resultados do modelo matemático formulado para simular o processo dinâmico da incrustação dos líquidos residuais da indústria, demonstram a aplicabilidade do algoritmo em prever a deposição da proteína nas condições de processo, sendo que para isso é necessário conhecer as propriedades físicas e composição desses líquidos. É importante lembrar que na literatura não há qualquer resultado como os reportados neste trabalho.

2) Dos quatro líquidos residuais da indústria, estudados (Bovino, Suíno, Frango e Peixe), o que apresenta a maior taxa de deposição em um tempo menor é o Bovino, seguido de Suíno, Frango e Peixe. Esta variação deve-se principalmente à influência de duas variáveis: a densidade e a concentração molar (densidade molar) de cada líquido.

3) O efeito da resistência da incrustação sobre o coeficiente operacional de transferência de calor, mostra uma diminuição maior para o líquido de peixe (27 %), seguida dos líquidos de Bovino e de Suíno (23 %) e do líquido do Frango (13 %).

Por tanto a equação (12d) fica:

$$T = 13,2 \text{Pr} + \frac{\text{Pr}_t}{k} \ln y^+ - \ln 13,2 + C \quad (11e)$$

Resultando o perfil da temperatura:

$$T = 13,2 \text{Pr} + \frac{\text{Pr}_t}{k} \ln \left[y^+ \frac{1,5 \left(1 + \frac{r}{r_0} \right)}{1 + 2 \left(\frac{r}{r_0} \right)^2} \right] - 5,8 \quad (11e)$$

Apêndice A.2 Concentração de saturação da espécie A (proteína)

É uma equação de tipo exponencial que está em função da temperatura da interface líquido-sólido e que contém duas constantes (a e b), que foram tomadas de (COLOWICK & KAPLAN 1955).

$$C'_{Ao} = a \exp\left(\frac{-b}{T_0}\right)$$

Onde:

a : constante 6,8 (kg mol/m³) solubilidade na ausência de sal

b : 0,5 (constante de Salting out)

T_0 : Temperatura da interface líquido- sólido (K).


```

var aux:string;
    err:integer;
begin
    ClrScr;
    write('Entre com o numero de interacoes: ');
    readln(aux);
    val(aux,n,err);
{ n := 4; }
    write('Entre com a densidade molar: ');
    readln(aux);
    val(aux,C,err);
{ C := 2300; }
    write('Entre com a concentracao inicial: ');
    readln(aux);
    val(aux,Cabavg0,err);
{ Cabavg0 := 0.569; }
    write('Entre com massa molar: ');
    readln(aux);
    val(aux,Ma,err);
{ Ma := 2459.7; }
    write('Entre com o fluxo de calor: ');
    readln(aux);
    val(aux,qr0,err);
{ qr0 := 4135; }
    write('Entre com a variacao do tempo: ');
    readln(aux);
    val(aux,dt,err);
{ dt := 0.1; }
    write('Entre com a temperatura de ingresso: ');
    readln(aux);
    val(aux,Tbavg0,err);
{ Tbavg0 := 298; }
    write('Entre com a variacao do comprimento: ');
    readln(aux);
    val(aux,dz,err);
{ dz := 0.1; }
    write('Entre com a velocidade de fluxo de massa: ');
    readln(aux);
    val(aux,W,err);
{ w := 0.5; }
    write('Entre com a densidade da camada de incrustacao: ');
    readln(aux);
    val(aux,Pfavg,err);
{ Pfavg := 1050; }
end;
{Calculo de Cpavg}
function f1(Tbavg:extended):extended;

```

```

begin
  f1:=(1.6 + 2.6 * Cw + 0.015 * Cf * Tbavg)*1E3;
end;
{Calculo de Pbavg}
function f2(Tbavg:extended):extended;
begin
  f2:=( (0.9861*exp((0.045)*ln(0.18))) -( 0.002*2/(1.32*(55-Tbavg)))-(0.55E-
3*Tbavg))* 1E3;
end;
{Calculo de Vz}
function f3(r:extended):extended;
begin
  f3:=2.5*(ln((y*1.5*(1+(rinit/r0))/(1+2*sqr(rinit/r0))))+5.5);
end;
{Calculo de V2}
Function f99:extended;
begin
  f99 := f3(R)*v;
end;
{Calcula TT0}
function f4(Tbavg,qR0,h0,R:extended):extended;
function f_aux(h0:extended):extended;
begin
  f_aux:=rinit*h0;
end;
begin
  f4:=Tbavg + (R0 * qR0) / f_aux(h0);
end;
{Calcula TT}
function f5(R:extended):extended;
begin
  f5:=13.9*Pr + (Pr/K)*ln( (y*1.5*(1 + rinit/R0)) / (1 + 2*sqr(rinit/R0)) ) - 5.8;
end;
{Calcula h}
function f6(qr0,R,TT0,TT:extended):extended;
begin
  f6:=(R0*qr0) / (rinit * (TT0 - TT));
end;
{Calcula Ca0}
function f7(TT0:extended):extended;
begin
  f7:=a*exp(-b / TT0);
end;
Calculo de Ca}
function f8:extended; {ok}
var aux,aux2,aux3: extended;
function f13:extended; {ok}

```

```

var aux2: extended;
begin
  aux2:=1-exp( (1/3)*ln(Sc) )*((r0-rinit)*0.061*Pbavg/u)/14.5)+exp( (2/3)*ln(Sc)
)*sqrt((((r0-rinit)*0.061*Pbavg/u)/14.5));
  f13 := aux2;
end;
Function f12:extended; {ok}
var aux: extended;
begin
  aux:=0.5*ln( ( sqrt(1 + exp( (1/3)*ln(Sc) )*((r0-rinit)*0.061*Pbavg/u)/14.5) ) / f13 );
  f12 := aux;
end;
function f14:extended; {ok}
begin
  f14:=sqrt(3)*arctan( ((10/14.5)*exp((1/3)*ln(Sc))-1)/sqrt(3) ) + Pi*sqrt(3)/6;
end;
function f9:extended; {ok}
var aux:extended;
begin
  aux:=f12 + sqrt(3)*
  arctan( ( exp((1/3)*ln(Sc)) * (2*((r0-rinit)*0.061*Pbavg/u)/14.5) - 1) /sqrt(3) )
  + Pi*sqrt(3)/6;
  f9 := aux;
end;
function f10:extended; {ok}
var aux: extended;
begin
  aux := exp((2/3)*ln(Sc));
  f10:=0.5*ln( (sqrt(1+(5/14.5)*exp((1/3)*ln(Sc)))/(1-
(5/14.5)*exp((1/3)*ln(Sc))+sqrt(5/14.5)*aux)) )+f14;
end;
function f11:extended; {ok}
begin
  f11:=sqrt(2/f) + ( (14.5/3)*exp( (2/3) * ln(Sc) ) * f10 + 5* ln(
(1+5.64*(Sc))/(6.64*(1+0.041*(Sc)))) -4.77);
end;
begin
  aux := f9;
  aux2 := f11;
  aux3 :=(14.5 / 3) * exp( (2/3) * ln (Sc) ) * aux / aux2;
  f8 := aux3;
end;
{Calcula Cal}
function f15(Ca:extended):extended;
var aux,aux2:extended;
begin
  aux:= Ca*(2*r0*vl*Pbavg/(4*x))*((vl/sqr(v)))+(5/v)*((sc-1)+ln((5*sc-1)/6));

```

```

    aux2 := aux;
    f15 := aux2;
end;
{Calcula Kxa} {ok}
function f16(Cal:extended):extended;
var f,aux:extended;
begin
    f := f99;
    aux := (((h/(737*3977*f))*exp((2/3)*ln(4.22)))/exp((2/3)*ln(Sc)))*Cal*f;
    f16 := aux/219;
end;
{Calcula Tbavg}
function f17(Tbavg0,qr0:extended):extended;
begin
    f17:=Tbavg0+((6.28*R0*6030)/(0.424*737));
end;
{Calcula DCabavg}
function f18:extended;
var aux,aux2,aux3:extended;
begin
    aux:= (0.424*C);
    aux2:= (Pbavg* Kxa*(Cabavg-Ca0))*R*dz;
    aux3:= (aux2/aux);
    f18:= (2*Pi)*aux3;
end;
{Calcula DTabavg}
function f19:extended;
begin
    f19:=(2*Pi*R0*qR0*dz)/(0.424*Cpavg);
end;
{Calcula DR}
function f20:extended;
var aux,tempo:extended;
begin
    tempo := matrix[t-1][0][1];
    aux:=(Ma*Kxa/(C*737))*(Ca0-Cabavg)*tempo;
    f20 := aux;
end;
{*****}
{*
{*          Programa Principal
{*
{******}
begin
    ClrScr;
    Write('Escolha o dispositivo de SAIDA? [M]ideo [I]mpressora ');
    Repeat

```

```

    disp := READKEY;
Until disp IN ['V','I','v','i'];
Write(disp);
{Inicializacao das variaveis}
t:=0;
GetData(n, C, Cabavg0, Ma, qr0, dt, Tbavg0, dz, W, Pfavg);
ClrScr;
for loop1:=0 to n do
begin
    matrix[t][loop1][1]:=0;
    matrix[t][loop1][2]:=loop1*dz;
    matrix[t][loop1][3]:=R0;
end;
repeat
tbavg := tbavg0;
Cabavg :=Cabavg0;
{Monta matriz de tamanho n}
for i:=0 to n do
begin
    Z:=matrix[t][i][2];
    R:=matrix[t][i][3];
    Cpavg:=f1(Tbavg);
    Pbavg:=f2(Tbavg);
    Vz:=f3(R);
    h0:=S;
repeat
    Tbavg:=f17(Tbavg0,qr0);
    TT0:=f4(Tbavg,qr0,h0,R);
    TT:=f5(R);
    h:=f6(qr0,R,TT0,Tbavg);
    h0:=h;
    Tbavg0:=Tbavg;
until((400<=h0) and (h0<=600));
Ca0:=f7(TT0);
Ca:=f8;
Cal:=f15(Ca);
Kxa:=f16(Cal);
matrix[t][i][4]:=Tbavg;
matrix[t][i][5]:=Cabavg;
matrix[t][i][6]:=Kxa;
matrix[t][i][7]:=TT0;
matrix[t][i][8]:=Ca0;
DCabavg:=f18;
Cabavg:=Cabavg+DCabavg;
DTbavg:=f19;
end;
{Escreve a matriz de resposta}

```

```

if (UPCASE(disp)='I') Then
Begin
writeln(1st,t          z          R          Tbavg ');
writeln(1st,'Cabavg          Kxa          T0          Ca0');
writeln(1st,'-----');
for i:=1 to n do
begin
for j:=1 to 4 do
write(1st,matrix[t][i][j]:16:-3,' ');
writeln(1st);
for j:=5 to 8 do
write(1st,matrix[t][i][j]:16:-3,' ');
writeln(1st);
writeln(1st,'-----');
end;
end;
writeln('t          z          R          Tbavg ');
writeln('Cabavg          Kxa          T0          Ca0');
writeln('-----');
for i:=1 to n do
begin
for j:=1 to 4 do
write(matrix[t][i][j]:16:-3,' ');
writeln;
for j:=5 to 8 do
write(matrix[t][i][j]:16:-3,' ');
writeln;
writeln('-----');
end;
t:=t+1;
DR:=f20;
for loop1:=0 to n do
begin
R:=R-DR;
matrix[t][loop1][1]:=t*dt;
matrix[t][loop1][2]:=loop1*dz;
matrix[t][loop1][3]:=R;
end;
writeln('Outra matriz? (s/n)');
resposta:=readkey;
until (upcase(resposta)='N') or (t=100);
end.

```

```
{SN+}
```

```
*****
{*
{*
{*
{*
{*
{*
{*
{*
{*
{*
*****
```

```
program fouling; {Suino}
```

```
{uses wincrt;} {WINDOWS}
```

```
uses crt, printer; {DOS}
```

```
{ Constantes utilizadas no programa}
```

```
Const R0=0.0114;
```

```
    Cw=0.83;
```

```
    Cf=0.10;
```

```
    Mi=284;
```

```
    Ps=1.66;
```

```
    S=500;
```

```
    Pr=4.21;
```

```
    Sc=32;
```

```
    Prt=0.9;
```

```
    K=0.46;
```

```
    y=204;
```

```
    a=6.8;
```

```
    b=0.5;
```

```
    u=0.456E-3;
```

```
    v=0.062;
```

```
    f=0.0078;
```

```
    vl=1.32;
```

```
    x=1;
```

```
    rinit=0.005;
```

```
{Definicao das matrizes finais de respostas}
```

```
type colunas=array[1..8] of extended;
```

```
    matriz=array[0..10] of colunas;
```

```
{Definicao das variaveis do programa}
```

```
var n, i,j,t,loop1,loop2:integer;
```

```
    resposta,disp:char;
```

```
    matrix:array[0..70] of matriz;
```

```
    Vz, Z, R, DR, C, Ca, Cal, Ca0, Cpavg, Cabavg, Cabavg0, DCabavg, Ma, qr0,  
dt:extended;
```

```
    TT, TT0, h, h0, Tbavg, DTbavg, Tbavg0, dz, W, Pbavg, Pfavg, Kxa: extended;
```

```
procedure GetData(var n:integer;var C, Cabavg0, Ma, qr0, dt, Tbavg0, dz, W, Pfavg:  
extended);
```

```

var aux:string;
    err:integer;
begin
    ClrScr;
    write('Entre com o numero de interacoes: ');
    readln(aux);
    val(aux,n,err);
{   n := 4; }
    write('Entre com a densidade binaria: ');
    readln(aux);
    val(aux,C,err);
{   C := 2300; }
    write('Entre com a concentracao inicial: ');
    readln(aux);
    val(aux,Cabavg0,err);
{   Cabavg0 := 0.569; }
    write('Entre com Massa molar: ');
    readln(aux);
    val(aux,Ma,err);
{   Ma := 2459.7; }
    write('Entre com o fluxo de calor: ');
    readln(aux);
    val(aux,qr0,err);
{   qr0 := 4135; }
    write('Entre com a variacao do tempo: ');
    readln(aux);
    val(aux,dt,err);
{   dt := 0.1; }
    write('Entre com a temperatura de ingresso: ');
    readln(aux);
    val(aux,Tbavg0,err);
{   Tbavg0 := 298; }
    write('Entre com a variacao do comprimento: ');
    readln(aux);
    val(aux,dz,err);
{   dz := 0.1; }
    write('Entre com a velocidade de fluxo de massa: ');
    readln(aux);
    val(aux,W,err);
{   w := 0.5; }
    write('Entre com a densidade da camada de incrustacao: ');
    readln(aux);
    val(aux,Pfavg,err);
{   Pfavg := 1050; }
end;
{Calculo de Cpavg}
function f1(Tbavg:extended):extended;

```

```

begin
  f1:=(1.6 + 2.6 * Cw + 0.015 * Cf * Tbavg)*1E3;
end;
{Calculo de Pbavg}
function f2(Tbavg:extended):extended;
begin
  f2:= ( (0.9861*exp((0.045)*ln(0.17))) - (0.002*2/(1.32*(55-Tbavg))) - (0.55E-
3*Tbavg) ) *1E3;
end;
{Calculo de Vz}
function f3(r:extended):extended;
begin
  f3:=2.5*(ln((y*1.5*(1+(rinit/r0))/(1+2*sqr(rinit/r0))))+5.5);
end;
{Calculo de V2}
Function f99:extended;
begin
  f99 := f3(R)*v;
end;
{Calcula TT0}
function f4(Tbavg,qR0,h0,R:extended):extended;
function f_aux(h0:extended):extended;
begin
  f_aux:=rinit*h0;
end;
begin
  f4:=Tbavg + (R0 * qR0) /f_aux(h0);
end;
{Calcula TT}
function f5(R:extended):extended;
begin
  f5:=13.9*Pr + (Pr/K)*ln( (y*1.5*(1 + rinit/R0)) / (1 + 2*sqr(rinit/R0)) ) - 5.8;
end;
{Calcula h}
function f6(qr0,R, TT0,TT:extended):extended;
begin
  f6:=(R0*qr0) / (rinit * (TT0 - TT));
end;
{Calcula Ca0}
function f7(TT0:extended):extended;
begin
  f7:=a*exp(-b / TT0);
end;
{Calculo de Ca}
function f8:extended; {ok}
var aux,aux2,aux3: extended;
function f13:extended; {ok}

```

```

var aux2: extended;
begin
  aux2:=1-exp( (1/3)*ln(Sc) )*(((r0-rinit)*0.062*Pbavg/u)/14.5)+exp( (2/3)*ln(Sc)
)*sqr(((r0-rinit)*0.062*Pbavg/u)/14.5));
  f13 := aux2;
end;
function f12:extended; {ok}
var aux: extended;
begin
  aux:=0.5*ln( ( sqr(1 + exp( (1/3)*ln(Sc) )*(((r0-rinit)*0.062*Pbavg/u)/14.5) ) / f13) );
  f12 := aux;
end;
function f14:extended; {ok}
begin
  f14:=sqr(3)*arctan( ((10/14.5)*exp((1/3)*ln(Sc))-1)/sqr(3) ) + Pi*sqr(3)/6;
end;
function f9:extended; {ok}
var aux:extended;
begin
  aux:=f12 + sqr(3)*
  arctan( ( exp((1/3)*ln(Sc)) * (2*((r0-rinit)*0.062*Pbavg/u)/14.5) - 1) /sqr(3) )
  + Pi*sqr(3)/6;
  f9 := aux;
end;
function f10:extended; {ok}
var aux: extended;
begin
  aux := exp((2/3)*ln(Sc));
  f10:=0.5*ln( (sqr(1+(5/14.5)*exp((1/3)*ln(Sc)))/(1-
(5/14.5)*exp((1/3)*ln(Sc))+sqr(5/14.5)*aux)) )+f14;
end;
function f11:extended; {ok}
begin
  f11:=sqr(2/f) + ( (14.5/3)*exp( (2/3) * ln(Sc) ) * f10 + 5* ln(
(1+5.64*(Sc))/(6.64*(1+0.041*(Sc)))) -4.77);
end;
begin
  aux := f9;
  aux2 := f11;
  aux3 :=(14.5 / 3) * exp( (2/3) * ln (Sc) ) * aux / aux2;
  f8 := aux3;
end;
{Calcula Cal}
function f15(Ca:extended):extended;
var aux,aux2:extended;
begin
  aux:= Ca*(2*r0*vl*Pbavg/(4*x))*((vl/sqr(v))+(5/v)*((sc-1)+ln((5*sc-1)/6)));

```

```

    aux2 := aux;
    f15 := aux2;
end;
{Calcula Kxa} {ok}
function f16(Cal:extended):extended;
var f,aux:extended;
begin
    f := f99;
    aux := (((h/(918*4027*f))*exp((2/3)*ln(1.93)))/exp((2/3)*ln(Sc)))*Cal*f;
    f16 := aux/284;
end;
{Calcula Tbavg}
function f17(Tbavg0,qr0:extended):extended;
begin
    f17:=Tbavg0+((6.28*R0*6030)/(0.4*4027));
end;
{Calcula DCabavg}
function f18:extended;
var aux,aux2,aux3:extended;
begin
    aux:= (0.4*C);
    aux2:= (Pbavg *Kxa*(Cabavg-Ca0))*R*dz;
    aux3:= (aux2/aux);
    f18:= (2*Pi)*aux3;
end;
{Calcula DTabavg}
function f19:extended;
begin
    f19:=(2*Pi*R0*qR0*dz)/(0.4*Cpavg);
end;
{Calcula DR}
function f20:extended;
var aux,tempo:extended;
begin
    tempo := matrix[t-1][0][1];
    aux:=(Ma*Kxa/(C*1050))*(Ca0-Cabavg)*tempo;
    f20 := aux;
end;
{*****}
{*          *}
{*          *}
{*          *}
{*          *}
{*****}
begin
    ClrScr;
    Write('Escolha o dispositivo de SAIDA? [V]ideo [I]mpressora ');
    Repeat

```

```

disp := READKEY;
Until disp IN ['V','I','v','i'];
Write(disp);
{Inicializacao das variaveis}
t:=0;
GetData(n, C, Cabavg0, Ma, qr0, dt, Tbavg0, dz, W, Pfavg);
ClrScr;
for loop1:=0 to n do
begin
  matrix[t][loop1][1]:=0;
  matrix[t][loop1][2]:=loop1*dz;
  matrix[t][loop1][3]:=R0;
end;
repeat
tbavg := tbavg0;
Cabavg :=Cabavg0;
{Monta matriz de tamanho n}
for i:=0 to n do
begin
  Z:=matrix[t][i][2];
  R:=matrix[t][i][3];
  Cpavg:=f1(Tbavg);
  Pbavg:=f2(Tbavg);
  Vz:=f3(R);
  h0:=S;
  repeat
    Tbavg:=f17(Tbavg0,qr0);
    TT0:=f4(Tbavg,qR0,h0,R);
    TT:=f5(R);
    h:=f6(qr0,R,TT0,Tbavg);
    h0:=h;
    Tbavg0:=Tbavg;
  until((400<=h0) and (h0<=600));
  Ca0:=f7(TT0);
  Ca:=f8;
  Cal:=f15(Ca);
  Kxa:=f16(Cal);
  matrix[t][i][4]:=Tbavg;
  matrix[t][i][5]:=Cabavg;
  matrix[t][i][6]:=Kxa;
  matrix[t][i][7]:=TT0;
  matrix[t][i][8]:=Ca0;
  DCabavg:=f18;
  Cabavg:=Cabavg+DCabavg;
  DTbavg:=f19;
end;
{Escreve a matriz de resposta}

```

```

if (UPCASE(dispatch)='I') Then
Begin
  writeln('t          z          R          Tbavg ');
  writeln('Cabavg          Kxa          T0          Ca0');
  writeln('-----');
  for i:=1 to n do
  begin
    for j:=1 to 4 do
      write('matrix[t][i][j]:16:-3, ');
    writeln(' ');
    for j:=5 to 8 do
      write('matrix[t][i][j]:16:-3, ');
    writeln(' ');
    writeln('-----');
  end;
end;
writeln('t          z          R          Tbavg ');
writeln('Cabavg          Kxa          T0          Ca0');
writeln('-----');
for i:=1 to n do
begin
  for j:=1 to 4 do
    write('matrix[t][i][j]:16:-3, ');
  writeln(' ');
  for j:=5 to 8 do
    write('matrix[t][i][j]:16:-3, ');
  writeln(' ');
  writeln('-----');
end;
t:=t+1;
DR:=f20;
for loop1:=0 to n do
begin
  R:=R-DR;
  matrix[t][loop1][1]:=t*dt;
  matrix[t][loop1][2]:=loop1*dz;
  matrix[t][loop1][3]:=R;
end;
writeln('Outra matriz? (s/n)');
resposta:=readkey;
until (upcase(resposta)='N') or (t=100);
end.

```

```
{ $N+ }
{ ***** }
{ * }
{ * }
{ * }
{ * }
{ * }
{ * }
{ * }
{ * }
{ * }
{ * }
{ ***** }
```

```
program fouling; {frango}
```

```
{uses wincrt;} {WINDOWS}
uses crt, printer; {DOS}
```

```
{ Constantes utilizadas no programa}
```

```
const R0=0.0114;
```

```
    Cw=0.6535;
```

```
    Cf=0.149;
```

```
    Mi=123;
```

```
    Ps=4.114;
```

```
    S=500;
```

```
    Pr=6.42;
```

```
    Sc=66;
```

```
    Prt=0.9;
```

```
    K=0.4;
```

```
    y=148;
```

```
    a=6.8;
```

```
    b=0.5;
```

```
    u=0.750E-3;
```

```
    v=0.059;
```

```
    f=0.0070;
```

```
    vl=1.0;
```

```
    x=1;
```

```
    rinit=0.005;
```

```
{Definicao das matrizes finais de respostas}
```

```
type colunas=array[1..8] of extended;
```

```
    matriz=array[0..10] of colunas;
```

```
{Definicao das variaveis do programa}
```

```
var n, i,j,t,loop1,loop2:integer;
```

```
    resposta,disp:char;
```

```
    matrix=array[0..70] of matriz;
```

```
    Vz, Z, R, DR, C, Ca, Cal, Ca0, Cpavg, Cabavg, Cabavg0, DCabavg, Ma, qr0,
```

```
    dt:extended;
```

```
    TT, TT0, h, h0, Tbavg, DTbavg, Tbavg0, dz, W, Pbavg, Pfavg, Kxa: extended
```

```
procedure GetData(var n:integer;var C, Cabavg0, Ma, qr0, dt, Tbavg0, dz, W, Pfavg:
extended);
```

```

var aux:string;
    err:integer;
begin
    ClrScr;
    write('Entre com o numero de interacoes: ');
    readln(aux);
    val(aux,n,err);
{   n := 4; }
    write('Entre com a densidade binaria: ');
    readln(aux);
    val(aux,C,err);
{   C := 2300; }
    write('Entre com a concentracao inicial: ');
    readln(aux);
    val(aux,Cabavg0,err);
{   Cabavg0 := 0.569; }
    write('Entre com Massa molar: ');
    readln(aux);
    val(aux,Ma,err);
{   Ma := 2459.7; }
    write('Entre com o fluxo de calor: ');
    readln(aux);
    val(aux,qr0,err);
{   qr0 := 4135; }
    write('Entre com a variacao do tempo: ');
    readln(aux);
    val(aux,dt,err);
{   dt := 0.1; }
    write('Entre com a temperatura de ingresso: ');
    readln(aux);
    val(aux,Tbavg0,err);
{   Tbavg0 := 298; }
    write('Entre com a variacao do comprimento: ');
    readln(aux);
    val(aux,dz,err);
{   dz := 0.1; }
    write('Entre com a velocidade de fluxo de massa: ');
    readln(aux);
    val(aux,W,err);
{   w := 0.5; }
    write('Entre com a densidade da camada de incrustacao: ');
    readln(aux);
    val(aux,Pfavg,err);
{   Pfavg := 1050; }
end;
{Calculo de Cpavg}
function f1(Tbavg:extended):extended;

```

```

begin
  f1:=(1.6 + 2.6 * Cw + 0.015 * Cf * Tbavg)*1E3;
end;
{Calculo de Pbavg}
function f2(Tbavg:extended):extended;
begin
  f2:= ( (0.9861*exp((0.045)*ln(0.3453))) - (0.002*2/(1.32*(55-Tbavg))) - (0.55E-
3*Tbavg) ) *1E3;
end;
{Calculo de Vz}
function f3(r:extended):extended;
begin
  f3:=2.5*(ln((y*1.5*(1+(rinit/r0)))/(1+2*sqr(rinit/r0))))+5.5);
end;
{Calculo de V2}
Function f99:extended;
begin
  f99 := f3(R)*v;
end;
{Calcula TT0}
function f4(Tbavg,qR0,h0,R:extended):extended;
function f_aux(h0:extended):extended;
begin
  f_aux:=rinit*h0;
end;
begin
  f4:=Tbavg + (R0 * qR0) /f_aux(h0);
end;
{Calcula TT}
function f5(R:extended):extended;
begin
  f5:=13.9*Pr + (Pr/K)*ln( (y*1.5*(1 + rinit/R0)) / (1 + 2*sqr(rinit/R0)) ) - 5.8;
end;
{Calcula h}
function f6(qr0,R,TT0,TT:extended):extended;
begin
  f6:=(R0*qr0) / (rinit * (TT0 - TT));
end;
{Calcula Ca0}
function f7(TT0:extended):extended;
begin
  f7:=a*exp(-b/TT0);
end;
{Calculo de Ca}
function f8:extended; {ok}
var aux,aux2,aux3: extended;
function f13:extended; {ok}

```

```

var aux2: extended;
begin
  aux2:=1-exp( (1/3)*ln(Sc) )*((r0-rinit)*0.059*Pbavg/u)/14.5)+exp( (2/3)*ln(Sc)
)*sqr(((r0-rinit)*0.059*Pbavg/u)/14.5));
  f13 := aux2;
end;
function f12:extended; {ok}
var aux: extended;
begin
  aux:=0.5*ln( ( sqr(1 + exp( (1/3)*ln(Sc) )*((r0-rinit)*0.059*Pbavg/u)/14.5) ) / f13 );
  f12 := aux;
end;
function f14:extended; {ok}
begin
  f14:=sqr(3)*arctan( ((10/14.5)*exp((1/3)*ln(Sc))-1)/sqr(3) ) + Pi*sqr(3)/6;
end;
function f9:extended; {ok}
var aux:extended;
begin
  aux:=f12 + sqr(3)*
  arctan( (( exp((1/3)*ln(Sc)) * (2*((r0-rinit)*0.059*Pbavg/u)/14.5) ) - 1) /sqr(3) )
  + Pi*sqr(3)/6;
  f9 := aux;
end;
function f10:extended; {ok}
var aux: extended;
begin
  aux := exp((2/3)*ln(Sc));
  f10:=0.5*ln( (sqr(1+(5/14.5)*exp((1/3)*ln(Sc)))/(1-
(5/14.5)*exp((1/3)*ln(Sc))+sqr(5/14.5)*aux)) )+f14;
end;
function f11:extended; {ok}
begin
  f11:=sqr(2/f) + ( (14.5/3)*exp( (2/3) * ln(Sc) ) * f10 + 5* ln(
(1+5.64*(Sc))/(6.64*(1+0.041*(Sc)))) -4.77);
end;
begin
  aux := f9;
  aux2 := f11;
  aux3 :=(14.5 / 3) * exp( (2/3) * ln (Sc) ) * aux / aux2;
  f8 := aux3;
end;
{Calcula Cal}
function f15(Ca:extended):extended;
var aux,aux2:extended;
begin
  aux:= Ca*(2*r0*vl*Pbavg/(4*x))*((vl/sqr(v))+(5/v)*((sc-1)+ln((5*sc-1)/6)));

```

```

    aux2 := aux;
    f15 := aux2;
end;
{Calcula Kxa} {ok}
function f16(Cal:extended):extended;
var f,aux:extended;
begin
    f := f99;
    aux := (((h/(918*4027*f))*exp((2/3)*ln(1.93)))/exp((2/3)*ln(Sc)))*Cal*f;
    f16 := aux/123;
end;
{Calcula Tbavg}
function f17(Tbavg0,qR0:extended):extended;
begin
    f17:=Tbavg0+((6.28*R0*6030)/(0.377*4027));
end;
{Calcula DCabavg}
function f18:extended;
var aux,aux2,aux3:extended;
begin
    aux:= (0.377*C);
    aux2:= (Pbavg *Kxa*(Cabavg-Ca0))*R*dz;
    aux3:= (aux2/aux);
    f18:= (2*Pi)*aux3;
end;
{Calcula DTabavg}
function f19:extended;
begin
    f19:=(2*Pi*R0*qR0*dz)/(0.377*Cpavg);
end;
{Calcula DR}
function f20:extended;
var aux,tempo:extended;
begin
    tempo := matrix[t-1][0][1];
    aux:=(Ma*Kxa/(C*1050))*(Ca0-Cabavg)*tempo;
    f20 := aux;
end;
{*****}
{*
{*          Programa Principal
{*
{******}
begin
    ClrScr;
    Write('Escolha o dispositivo de SAIDA? [V]ideo [I]mpressora ');
    Repeat

```

```

disp := READKEY;
Until disp IN ['V','I','v','i'];
Write(disp);

{Inicializacao das variaveis}
t:=0;
GetData(n, C, Cabavg0, Ma, qr0, dt, Tbavg0, dz, W, Pfavg);
ClrScr;
for loop1:=0 to n do
begin
  matrix[t][loop1][1]:=0;
  matrix[t][loop1][2]:=loop1*dz;
  matrix[t][loop1][3]:=R0;
end;
repeat
tbavg := tbavg0;
Cabavg :=Cabavg0;
{Monta matriz de tamanho n}
for i:=0 to n do
begin
  Z:=matrix[t][i][2];
  R:=matrix[t][i][3];
  Cpavg:=f1(Tbavg);
  Pbavg:=f2(Tbavg);
  Vz:=f3(R);
  h0:=S;
  repeat
    Tbavg:=f17(Tbavg0,qr0);
    TT0:=f4(Tbavg,qR0,h0,R);
    TT:=f5(R);
    h:=f6(qr0,R,TT0,Tbavg);
    h0:=h;
    Tbavg0:=Tbavg;
  until((400<=h0) and (h0<=600));
  Ca0:=f7(TT0);
  Ca:=f8;
  Cal:=f15(Ca);
  Kxa:=f16(Cal);
  matrix[t][i][4]:=Tbavg;
  matrix[t][i][5]:=Cabavg;
  matrix[t][i][6]:=Kxa;
  matrix[t][i][7]:=TT0;
  matrix[t][i][8]:=Ca0;
  DCabavg:=f18;
  Cabavg:=Cabavg+DCabavg;
  DTbavg:=f19;
end;

```

```

{Escreve a matriz de resposta}
if (UPCASE(dispatch)='I') Then
Begin
  writeln('t          z          R          Tbavg ');
  writeln('Cabavg      Kxa      T0          Ca0');
  writeln('-----');
  for i:=1 to n do
  begin
    for j:=1 to 4 do
      write('matrix[t][i][j]:16:-3, ');
    writeln(' ');
    for j:=5 to 8 do
      write('matrix[t][i][j]:16:-3, ');
    writeln(' ');
    writeln('-----');
  end;
end;
writeln('t          z          R          Tbavg ');
writeln('Cabavg      Kxa      T0          Ca0');
writeln('-----');
for i:=1 to n do
begin
  for j:=1 to 4 do
    write('matrix[t][i][j]:16:-3, ');
  writeln(' ');
  for j:=5 to 8 do
    write('matrix[t][i][j]:16:-3, ');
  writeln(' ');
  writeln('-----');
end;
t:=t+1;
DR:=f20;
for loop1:=0 to n do
begin
  R:=R-DR;
  matrix[t][loop1][1]:=t*dt;
  matrix[t][loop1][2]:=loop1*dz;
  matrix[t][loop1][3]:=R;
end;
writeln('Outra matriz? (s/n)');
resposta:=readkey;
until (upcase(resposta)='N') or (t=100);
end.

```

\$N+}

```

*****
*
*
*
*
*
*
*
*
*
*
*
*
*****

```

```

program fouling; {peixe}
{uses wincrt;} {WINDOWS}
uses crt, printer; {DOS}
{ Constantes utilizadas no programa}
Const R0=0.0114;
    Cw=0.9083;
    Cf=0.02;
    Mi=793;
    Ps=0.65;
    S=500;
    Pr=2.9;
    Sc=17.51;
    Prt=0.9;
    K=0.46;
    y=278;
    a=6.8;
    b=0.5;
    u=0.342E-3;
    v=0.055;
    f=0.0061;
    vl=1.0;
    x=1;
    rinit=0.005;
{Definicao das matrizes finais de respostas}
type colunas=array[1..8] of extended;
    matriz=array[0..10] of colunas;
{Definicao das variaveis do programa}
var n, i,j,t,loop1,loop2:integer;
    resposta,disp:char;
    matrix=array[0..70] of matriz;
    Vz, Z, R, DR, C, Ca, Cal, Ca0, Cpavg, Cabavg, Cabavg0, DCabavg, Ma, qr0,
dt:extended;
    TT, TT0, h, h0, Tbavg, DTbavg, Tbavg0, dz, W, Pbavg, Pfavg, Kxa: extended;
procedure GetData(var n:integer;var C, Cabavg0, Ma, qr0, dt, Tbavg0, dz, W, Pfavg:
extended);

```

```

var aux:string;
    err:integer;
begin
    ClrScr;
    write('Entre com o numero de interacoes: ');
    readln(aux);
    val(aux,n,err);
    { n := 4; }
    write('Entre com a densidade binaria: ');
    readln(aux);
    val(aux,C,err);
    { C := 2300; }
    write('Entre com a concentracao inicial: ');
    readln(aux);
    val(aux,Cabavg0,err);
    { Cabavg0 := 0.569; }
    write('Entre com Massa molar: ');
    readln(aux);
    val(aux,Ma,err);
    { Ma := 2459.7; }
    write('Entre com o fluxo de calor: ');
    readln(aux);
    val(aux,qr0,err);
    { qr0 := 4135; }
    write('Entre com a variacao do tempo: ');
    readln(aux);
    val(aux,dt,err);
    { dt := 0.1; }
    write('Entre com a temperatura de ingresso: ');
    readln(aux);
    val(aux,Tbavg0,err);
    { Tbavg0 := 298; }
    write('Entre com a variacao do comprimento: ');
    readln(aux);
    val(aux,dz,err);
    { dz := 0.1; }
    write('Entre com a velocidade de fluxo de massa: ');
    readln(aux);
    val(aux,W,err);
    { w := 0.5; }
    write('Entre com a densidade da camada de incrustacao: ');
    readln(aux);
    val(aux,Pfavg,err);
    { Pfavg := 1050; }
end;
{Calculo de Cpavg}
function f1(Tbavg:extended):extended;

```

```

begin
  f1:=(1.6 + 2.6 * Cw + 0.015 * Cf * Tbavg)*1E3;
end;
{Calculo de Pbavg}
function f2(Tbavg:extended):extended;
begin
  f2:= ( (0.9861*exp((0.045)*ln(0.0917))) - (0.002*2/(1.32*(55-Tbavg))) - (0.55E-
3*Tbavg) ) *1E3;
end;
{Calculo de Vz}
function f3(r:extended):extended;
begin
  f3:=2.5*(ln((y*1.5*(1+(rinit/r0))/(1+2*sqr(rinit/r0))))+5.5);
end;
{Calculo de V2}
Function f99:extended;
begin
  f99 := f3(R)*v;
end;
{Calcula TT0}
function f4(Tbavg,qR0,h0,R:extended):extended;
function f_aux(h0:extended):extended;
begin
  f_aux:=rinit*h0;
end;
begin
  f4:=Tbavg + (R0 * qR0) /f_aux(h0);
end;
{Calcula TT}
function f5(R:extended):extended;
begin
  f5:=13.9*Pr + (Prt/K)*ln( (y*1.5*(1 + rinit/R0)) / (1 + 2*sqr(rinit/R0)) ) - 5.8;
end;
{Calcula h}
function f6(qr0,R,TT0,TT:extended):extended;
begin
  f6:=(R0*qr0) / (rinit * (TT0 - TT));
end;
{Calcula Ca0}
function f7(TT0:extended):extended;
begin
  f7:=a*exp(-b / TT0);
end;
{Calculo de Ca}
function f8:extended; {ok}
var aux,aux2,aux3: extended;
function f13:extended; {ok}

```

```

var aux2: extended;
begin
  aux2:=1-exp( (1/3)*ln(Sc) )*((r0-rinit)*0.055*Pbavg/u)/14.5)+exp( (2/3)*ln(Sc)
)*sqr(((r0-rinit)*0.055*Pbavg/u)/14.5));
  f13 := aux2;
end;
function f12:extended; {ok}
var aux: extended;
begin
  aux:=0.5*ln( ( sqr(1 + exp( (1/3)*ln(Sc) )*((r0-rinit)*0.055*Pbavg/u)/14.5) ) / f13 );
  f12 := aux;
end;
function f14:extended; {ok}
begin
  f14:=sqr(3)*arctan( ((10/14.5)*exp((1/3)*ln(Sc))-1)/sqr(3) ) + Pi*sqr(3)/6;
end;
function f9:extended; {ok}
var aux:extended;
begin
  aux:=f12 + sqr(3)*
  arctan( ( exp((1/3)*ln(Sc)) * (2*((r0-rinit)*0.055*Pbavg/u)/14.5) ) - 1) /sqr(3) )
  + Pi*sqr(3)/6;
  f9 := aux;
end;
function f10:extended; {ok}
var aux: extended;
begin
  aux := exp((2/3)*ln(Sc));
  f10:=0.5*ln( (sqr(1+(5/14.5)*exp((1/3)*ln(Sc)))/(1-
(5/14.5)*exp((1/3)*ln(Sc))+sqr(5/14.5)*aux)) )+f14;
end;
function f11:extended; {ok}
begin
  f11:=sqr(2/f) + ( (14.5/3)*exp( (2/3) * ln(Sc) ) * f10 + 5* ln(
(1+5.64*(Sc))/(6.64*(1+0.041*(Sc)))) -4.77);
end;
begin
  aux := f9;
  aux2 := f11;
  aux3 :=(14.5 / 3) * exp( (2/3) * ln ( Sc ) ) * aux / aux2;
  f8 := aux3;
end;
{Calcula Cal}
function f15(Ca:extended):extended;
var aux,aux2:extended;
begin
  aux:= Ca*(2*r0*vl*Pbavg/(4*x))*((vl/sqr(v))+(5/v)*((sc-1)+ln((5*sc-1)/6)));

```

```

    aux2 := aux;
    f15 := aux2;
end;
{Calcula Kxa} {ok}
function f16(Cal:extended):extended;
var f,aux:extended;
begin
    f := f99;
    aux := (((h/(918*4059*f))*exp((2/3)*ln(1.93)))/exp((2/3)*ln(Sc)))*Cal*f;
    f16 := aux/793;
end;
{Calcula Tbavg}
function f17(Tbavg0,qR0:extended):extended;
begin
    f17:=Tbavg0+((6.28*R0*6030)/(0.419*4059));
end;
{Calcula DCabavg}
function f18:extended;
var aux,aux2,aux3:extended;
begin
    aux:= (0.419*C);
    aux2:= (Pbavg *Kxa*(Cabavg-Ca0))*R*dz;
    aux3:= (aux2/aux);
    f18:= (2*Pi)*aux3;
end;
{Calcula DTabavg}
function f19:extended;
begin
    f19:=(2*Pi*R0*qR0*dz)/(0.419*Cpavg);
end;
{Calcula DR}
function f20:extended;
var aux,tempo:extended;
begin
    tempo := matrix[t-1][0][1];
    aux:=(Ma*Kxa/(C*1050))*(Ca0-Cabavg)*tempo;
    f20 := aux;
end;
{*****}
{*
{*          Programa Principal
{*
{*          *****}
begin
    ClrScr;
    Write('Escolha o dispositivo de SAIDA? [V]ideo [I]mpressora ');
    Repeat

```

```

disp := READKEY;
Until disp IN ['V','I','v','i'];
Write(disp);

{Inicializacao das variaveis}
t:=0;
GetData(n, C, Cabavg0, Ma, qr0, dt, Tbavg0, dz, W, Pfavg);
ClrScr;
for loop1:=0 to n do
begin
  matrix[t][loop1][1]:=0;
  matrix[t][loop1][2]:=loop1*dz;
  matrix[t][loop1][3]:=R0;
end;
repeat
tbavg := tbavg0;
Cabavg :=Cabavg0;
{Monta matriz de tamanho n}
for i:=0 to n do
begin
  Z:=matrix[t][i][2];
  R:=matrix[t][i][3];
  Cpavg:=f1(Tbavg);
  Pbavg:=f2(Tbavg);
  Vz:=f3(R);
  h0:=S;
  repeat
    Tbavg:=f17(Tbavg0,qr0);
    TT0:=f4(Tbavg,qR0,h0,R);
    TT:=f5(R);
    h:=f6(qr0,R,TT0,Tbavg);
    h0:=h;
    Tbavg0:=Tbavg;
  until((400<=h0) and (h0<=600));
  Ca0:=f7(TT0);
  Ca:=f8;
  Cal:=f15(Ca);
  Kxa:=f16(Cal);
  matrix[t][i][4]:=Tbavg;
  matrix[t][i][5]:=Cabavg;
  matrix[t][i][6]:=Kxa;
  matrix[t][i][7]:=TT0;
  matrix[t][i][8]:=Ca0;
  DCabavg:=f18;
  Cabavg:=Cabavg+DCabavg;
  DTbavg:=f19;
end;

```

```

{Escreve a matriz de resposta}
if (UPCASE(dispatch)='I') Then
Begin
  writeln(1st,'t          z          R          Tbavg ');
  writeln(1st,'Cabavg          Kxa          T0          Ca0');
  writeln(1st,'-----');
  for i:=1 to n do
  begin
    for j:=1 to 4 do
      write(1st,matrix[t][i][j]:16:-3,' ');
    writeln(1st);
    for j:=5 to 8 do
      write(1st,matrix[t][i][j]:16:-3,' ');
    writeln(1st);
    writeln(1st,'-----');
  end;
end;
writeln('t          z          R          Tbavg ');
writeln('Cabavg          Kxa          T0          Ca0');
writeln('-----');
for i:=1 to n do
begin
  for j:=1 to 4 do
    write(matrix[t][i][j]:16:-3,' ');
  writeln;
  for j:=5 to 8 do
    write(matrix[t][i][j]:16:-3,' ');
  writeln;
  writeln('-----');
end;
t:=t+1;
DR:=f20;
for loop1:=0 to n do
begin
  R:=R-DR;
  matrix[t][loop1][1]:=t*dt;
  matrix[t][loop1][2]:=loop1*dz;
  matrix[t][loop1][3]:=R;
end;
writeln('Outra matriz? (s/n)');
resposta:=readkey;
until (upcase(resposta)='N') or (t=100);
end.

```

TESE DE Mestrado de Jean Lopez del Mar -[SIMULAÇÃO DA INCRUSTAÇÃO DE PROTEÍNAS DO PROCESSAMENTO ANIMAL NO INTERIOR DE TUBOS]

ERRATA

- Página 6, item 2.3, onde se lê: Cinética das Incrustações, leia-se: Cinética das Incrustações.
- Página 17, 1º parágrafo, 4ª a 6ª linha, onde se lê: Estima-se que esta não oferece nenhuma resistência ao de transporte de calor, enquanto a gordura atua como uma camada isolante à transferência de calor, leia-se: no item 3.2.3, da página 18.
- Página 18, 4º parágrafo, 7ª linha, onde se lê: (W/kg K), leia-se: (W/m² K).
- Página 40, 7º parágrafo, 5ª linha, onde se lê: condutividade térmica, leia-se: condutividade térmica.
- Página 61, 2º parágrafo, 4ª linha, onde se lê: Densidade e a concentração molar, leia-se: Difusividade e a viscosidade.
- Página 73, 1º parágrafo, 3ª linha, onde se lê: (COLOWICK & KAPLAN, 1955), leia-se: (GREEN & HUGHES, 1955).