



**UNIJUÍ – UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE VOLUMES FINITOS EM
MODELO MATEMÁTICO DE EXTRAÇÃO DE ÓLEO
VEGETAL**

ANA MARIA ROSINSKI DUTRA

Ijuí, RS – Brasil

2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ANA MARIA ROSINSKI DUTRA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE VOLUMES FINITOS EM MODELO
MATEMÁTICO DE EXTRAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Matemática.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Carlos Thomas.
Co-orientadora: Prof. Ms. Julhane Alice Thomas Schulz

Ijuí

2008

UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

DeFEM – DEPARTAMENTO DE FÍSICA, ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA

DeTEC – DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**“APLICAÇÃO DO MÉTODO DE VOLUMES FINITOS EM MODELO
MATEMÁTICO DE EXTRAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL”**

Elaborada por

ANA MARIA ROSINSKI DUTRA

Como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Matemática

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Gilberto Carlos Thomas – (Orientador/DeFEM)

Prof. Dr. Valdir Bólico Araújo (FAHOR)

Prof. Dr. Gilmar de Oliveira Veloso (DeFEM)

Ijuí, RS, Agosto 2008

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, pelo incentivo dado desde o início deste curso.

Ao meu esposo Ademir, pela compreensão, amor, estímulo e apoio.

Ao meu orientador Professor Doutor Gilberto Carlos Thomas, pela paciência, disponibilidade para orientação e atenção que sempre demonstrou nos momentos a mim dispensados.

A minha co-orientadora Professora Ms. Julhane Alice Thomas Schulz pela sua ajuda.

Aos meus amigos pelo estímulo.

Aos colegas de curso pela amizade.

Aos professores do curso de Mestrado em Modelagem Matemática pelos conhecimentos adquiridos.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus, por mais esta conquista.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | ix |
| ÍNDICE DE TABELAS..... | xi |
| RESUMO..... | xii |
| ABSTRACT..... | xiii |
| INTRODUÇÃO..... | 01 |
| 1.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 03 |
| 1.1 A cultura da soja..... | 03 |
| 1.1.1 Cultura da Soja no Rio Grande do Sul..... | 05 |
| 1.1.2 Soja..... | 05 |
| 1.1.3 Derivados da soja..... | 06 |
| 1.1.4 Soja transgênica e orgânica..... | 08 |
| 1.1.5 Perspectivas para o cultivo da soja..... | 08 |
| 1.2 Questão ambiental..... | 09 |
| 1.2.1 Importância e benefícios do Biodiesel..... | 10 |
| 1.3 Óleo de soja..... | 12 |
| 1.3.1 Extração de óleos..... | 13 |
| 1.3.2 Soja laminada e soja extrusada..... | 13 |
| 1.3.3 Vantagens da extrusão se comparando com a laminação..... | 15 |
| 1.4 Principais processos para a extração de óleo..... | 15 |
| 1.4.1 Preparação da soja para a extração..... | 16 |
| 1.5 Modelos Matemáticos aplicados à extração..... | 18 |
| 1.5.1 Modelo do tipo “Rotocell” | 18 |
| 1.5.2 Modelo evolutivo 2D para instalação industrial “De Smet”..... | 19 |
| 1.5.3 Modelo do extrator “Crown-Model”..... | 21 |

| | | |
|----------------|---|-----------|
| 1.6 | Métodos Numéricos..... | 23 |
| 1.6.1 | Método das Diferenças Finitas..... | 23 |
| 1.6.2 | Método dos Volumes Finitos..... | 26 |
| 1.7 | Colocação do problema..... | 30 |
| 2. | MODELO MATEMÁTICO..... | 31 |
| 2.1 | Esquema físico da extração em um leito fixo..... | 31 |
| 2.2 | Modelo matemático do Leito Fixo..... | 34 |
| 2.3 | Método Numérico Volumes Finitos..... | 38 |
| 2.3.1 | O Método de Volumes Finitos..... | 38 |
| 2.3.1.1 | Diferenças Centradas..... | 41 |
| 2.3.1.2 | Esquema Upwind..... | 43 |
| 3 – | SIMULAÇÕES NUMÉRICAS..... | 48 |
| | CONCLUSÃO..... | 64 |
| | REFERÊNCIAS..... | 66 |

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p – área específica de contato entre as fases poro e “bulk”.

A_v - área transversal do extrator leito fixo.

C_p - concentração de óleo da fase poro.

C – concentração de óleo na fase “bulk”.

d_p - diâmetro médio das partículas de matéria-prima.

D_{AB} - coeficiente de difusão na fase “bulk”.

E_d - constante de equilíbrio entre a fase sólida e poro.

ε_b - porosidade externa (fase “bulk”) da matéria-prima.

ε_p - porosidade interna (fase poro) da matéria-prima.

K_f - coeficiente de transferência de massa entre as fases poro e “bulk”.

L - altura do leito fixo.

V - fluxo advectivo.

τ - Tempo de extração.

Δ - incremento finito.

∇ - gradiente.

\bar{C}_m – alteração da concentração na bolsa da seção “ m ”.

m_s – o número de seções do extrator.

Γ - coeficiente de difusão para o transporte de C .

S_c - o termo fonte.

CV – controle de volume.

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Derivados da soja..... | 07 |
| Figura 1.2 Marco Regulatório do Biodiesel..... | 11 |
| Figura 1.3 Equipamento utilizado para laminação..... | 14 |
| Figura 1.4 Equipamento utilizado para extrusão..... | 14 |
| Figura 1.5 Esquema dos processos da extração de óleo de soja..... | 16 |
| Figura 1.6 Esquema do extrator “Rotocell”..... | 18 |
| Figura 1.7 Esquema do extrator “De Smet”..... | 20 |
| Figura 1.8 Extrator “Crown-Model”..... | 21 |
| Figura 1.9 Ilustração do MVF para obtenção das médias no VC \bar{C}_i^n usando os fluxos pelas extremidades da célula..... | 27 |
| Figura 2.1 Esquema do leito fixo..... | 31 |
| Figura 2.2 Esquema representativo das porosidades da matéria-prima..... | 31 |
| Figura 2.3 Esquema físico do extrator laboratorial de leito fixo..... | 32 |
| Figura 2.4 Extrator laboratorial de leito fixo..... | 33 |
| Figura 2.5 Representação da área específica de contato entre as fases poro e “bulk”..... | 34 |
| Figura 2.6 Esquema representativo do leito fixo..... | 35 |
| Figura 2.7 Esquema do volume finito..... | 40 |
| Figura 3.1 Variação da concentração do óleo em micela em várias seções do leito..... | 49 |
| Figura 3.2 Variação da concentração do óleo (C_p) em várias seções do leito..... | 49 |
| Figura 3.3 Variação da concentração do óleo em micela para $\varepsilon_b=0,5$ e $\varepsilon_p=0,4$ | 50 |
| Figura 3.4 Variação da concentração de óleo (C_p) para $\varepsilon_b=0,5$ e $\varepsilon_p=0,4$ | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.5 Variação da concentração do óleo na micela em várias seções do leite, com o valor de $C_p^o=18,5\%$ | 52 |
| Figura 3.6 Variação da concentração do óleo (C_p) em várias seções do leite com percentual inicial de 18,5% de óleo na matéria-prima..... | 53 |
| Figura 3.7 Variação da concentração do óleo em micela para $\varepsilon_b=0,5$, $\varepsilon_p=0,4$ e $C_p^o=18,5\%$ | 54 |
| Figura 3.8 Variação da concentração de óleo (C_p) para $\varepsilon_b=0,5$, $\varepsilon_p=0,4$ e $C_p^o=18,5\%$ | 55 |
| Figura 3.9 Variação da concentração do óleo em micela com alteração do E_d | 56 |
| Figura 3.10 Variação da concentração de óleo (C_p) com alteração do valor do E_d | 56 |
| Figura 3.11 Variação da concentração do óleo em micela devido o aumento na a_p | 57 |
| Figura 3.12 Variação da concentração de óleo (C_p) devido a um aumento do a_p | 58 |
| Figura 3.13 Variação da concentração do óleo em micela com o uso de metanol..... | 59 |
| Figura 3.14 Variação da concentração do óleo em micela com o uso do etanol..... | 60 |
| Figura 3.15 Variação da concentração do óleo (C_p) com o uso de metanol..... | 60 |
| Figura 3.16 Variação da concentração do óleo (C_p) com o uso de etanol..... | 61 |
| Figura 3.17 Variação da concentração do óleo em micela com girassol..... | 62 |
| Figura 3.18 Variação da concentração do óleo (C_p) com girassol..... | 63 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1.1 Exportações do Complexo Soja-1998 à 2007..... | 05 |
| Tabela 1.2 Composição média (%) do grão de soja e de seus componentes..... | 06 |
| Tabela 1.3 Concentração de minerais nos grãos de soja e percentual das necessidades nutricionais recomendadas..... | 06 |

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de fazer um estudo da modelagem matemática dos fenômenos de extração de óleo vegetal utilizando volumes finitos. O modelo considera um extrator de leito fixo, onde verticalmente há um fluxo de solvente que percola através do leito e extrai o óleo contido na matéria sólida, onde ocorre transferência de óleo da fase poro à fase “bulk” e passagem do óleo entre as fases poro e sólida. O modelo matemático é formado por duas equações em derivadas parciais que foram discretizadas utilizando o método de volumes finitos, os termos difusivos foram discretizados com o auxílio da aproximação por diferenças centradas, onde usou-se o esquema upwind para evitar o aparecimento de coeficientes negativos e as oscilações numéricas. O sistema de equações algébricas gerado foi resolvido com o auxílio do programa desenvolvido por S.V. PATANKAR, que é bastante utilizado em pesquisas científicas por ser muito confiável, sendo que utiliza volumes finitos que é o objetivo deste trabalho. Foram realizadas simulações numéricas onde se variou a porosidade “bulk” e porosidade poro, a concentração inicial de óleo na matéria-prima, a constante de equilíbrio entre a fase sólida e poro, o tamanho da área específica de contato entre as fases poro e “bulk”, a substituição do solvente hexano por metanol e por etanol, e também a substituição da matéria-prima soja para o girassol.

ABSTRACT

This work was developed with the intention of doing a study of the mathematical modeling of the phenomena of extraction of vegetable oil using finite volumes. The model considers an extractor of fixed bed, where vertically has a solvent flow that percolate through the bed and it extracts the oil contained in the solid matter, where it happens oil transfer of the phase pore to the phase "bulk" and passage of the oil among the phases pore and solid. The mathematical model is formed by two equations in having flowed partial that they were executed using the method of finite volumes, the terms diffusion were executed with the aid of the approach for centered differences, where the outline upwind was used to avoid the emergence of negative coefficients and the numeric oscillations. The system of algebraic equations it was solved with the aid of the program developed by S. V. PATANKAR that is quite used in scientific researches by being very reliable, and it uses finite volumes that is the objective of this work. Numeric simulations were accomplished where it was varied the porosities "bulk" and porosities pore, the initial concentration of oil in the raw material, the balance constant between the solid phase and pore, the size of the specific area of contact between the phases pore and "bulk", the substitution of the solvent hexane for methanol and for ethanol, and also the substitution of the raw material soy for the sunflower.

INTRODUÇÃO

A cultura da soja possui importância no cenário agrícola brasileiro pois influi nas discussões sobre pesquisa tecnológica, agroindustrial, cadeias produtivas e, até, infraestrutura. É considerado o principal complexo exportador e responsável pelos grandes investimentos agroindustriais brasileiros.

A soja é o quarto grão mais produzido no mundo. Podemos também destacar a importância da soja tendo em vista a enorme diversidade de derivados que possui, onde sendo uma matéria-prima para o biodiesel, contribuirá para a melhoria do meio ambiente.

O Brasil é um país que apresenta condições favoráveis para expandir a produção da oleaginosa soja. Contudo, é necessário o aprimoramento das indústrias de extração de óleos vegetais, visto que é imprescindível a racionalização dos processos, e a modelagem matemática é um instrumento de grande valia.

Para tanto faz-se necessário o entendimento de extratores de complexidade menor como o extrator de “Leito Fixo”, que consiste em um equipamento laboratorial que auxilia no trabalho de pesquisa e no entendimento do extrator real.

Foi desenvolvido um estudo do Método de Volumes Finitos para realizar a discretização das equações do trabalho que representam as variações de concentração de óleo na fase poro e “bulk”, essas equações discretizadas foram resolvidas com o auxílio do programa computacional desenvolvido por PATANKAR.

Buscou-se utilizar dados obtidos através de experimentos com o “Leito Fixo” para realizar simulações do comportamento do processo de extração de óleos vegetais com variação dos parâmetros, a_p , E_d , ε_p , ε_p , solvente e matéria-prima, obtendo assim o valor máximo da concentração de óleo em micela (C) e concentração de óleo na matéria-prima (C_p).

Diante disto pode-se mencionar que no capítulo I é feito um breve histórico sobre a cultura da soja, a questão ambiental, bem como a importância do biodiesel; diferenciação entre laminação e extrusão; análise das etapas do processo de extração de óleo de soja, a descrição dos modelos matemáticos relacionados com a extração, alguns métodos numéricos e também a colocação do problema.

No capítulo II é demonstrado o esquema físico da extração em leito fixo, o modelo matemático do leito fixo e o modelo escrito na forma de volumes finitos.

No capítulo III são desenvolvidas várias simulações, começando por um modelo básico, e sobre este, variando diversos parâmetros como a porosidade poro e porosidade “bulk”, a concentração inicial de óleo na matéria-prima, a constante de equilíbrio entre a fase sólida e fase poro, o tamanho da área específica de contato entre as fases poro e fase “bulk”, a substituição do solvente hexano por metanol e por etanol e também a substituição da matéria-prima soja por girassol.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feito um breve histórico sobre a cultura da soja (item 1.1), a questão ambiental, bem como a importância do biodiesel (1.2), comentários sobre o óleo de soja e diferenciação entre laminação e extrusão (1.3), seguido por uma análise de todas as etapas do processo de extração de óleo de soja (1.4). São descritos modelos matemáticos relacionados com a extração (1.5), além de alguns métodos numéricos: diferenças finitas e volumes finitos (1.6). Ainda neste capítulo é feita a colocação do problema que busca apresentar um modelo matemático para a extração de óleo vegetal utilizando o método de volumes finitos (1.7).

1.1 A Cultura da soja

A Soja que é cultivada atualmente, segundo Merrill, é diferente dos ancestrais que lhe deram origem: espécies de plantas rasteiras que se desenvolviam na costa leste da Ásia. Sua evolução deu-se com o aparecimento de plantas originárias de cruzamentos naturais entre espécies selvagens, que foram domesticadas e melhoradas por cientistas da antiga China.

Esta planta é reconhecida como uma das mais antigas cultivadas no Planeta, sendo conhecida e explorada no Oriente há mais de cinco mil anos. Mas apenas na segunda década do século XX houve a exploração comercial da soja nos EUA.

No Brasil a soja começou a ser explorada em 1882, trazida dos EUA. Inicialmente esta cultura era produzida como forrageira do que, como planta produtora de grãos para as indústrias de farelos e óleos vegetais. A partir de 1900 têm-se registro do primeiro cultivo de soja no RS, que encontrou efetivas condições climáticas para se desenvolver e expandir. Mas somente a partir dos anos 40 esta cultura adquiriu importância econômica. Em 1941 instalou-se a primeira indústria processadora de soja no País (Santa Rosa, RS) e foi em 1949 que o Brasil apareceu em estatísticas internacionais como produtor de soja.

A partir de 1960 a soja se estabeleceu como cultura economicamente importante para o Brasil onde quase sua totalidade era produzida nos três estados da Região Sul. Na década de 70 a cultura da soja se consolidou como a principal cultura do agronegócio brasileiro.

Nas décadas de 80 e 90 esta cultura começou a crescer na região centro-oeste sendo que em 2003 têm-se registros de aproximadamente 60% da produção nacional. Atualmente o estado do Mato Grosso é líder nacional de produção e de produtividade de soja.

A produção da soja como impulsionador de crescimento deu-se graças à evolução de técnicas de cultivo que permitiu a adaptação da planta para as condições de solo e clima no centro-oeste e a substituição da ocupação extensiva do Cerrado por uma atividade agrícola dinâmica. Além do baixo preço das terras aliado aos incentivos governamentais que visavam atender a demanda de grãos do setor agroindustrial incentivando a exportação e contribuindo para a melhoria da balança comercial.

Esse conjunto de fatores fez com que nas três últimas décadas houvesse um crescimento no volume da produção da soja no Brasil de quase 30 vezes, segundo a Embrapa.

Atualmente, a oleaginosa é responsável por 30% da renda agrícola nacional (dados da Confederação Nacional da Agricultura) e agrega mais de 243 mil produtores que ocupam cerca de 23,4 milhões de hectares de terras do País. Os três principais produtos do Complexo Soja (grão, farelo e óleo) respondem por cerca de 10% das exportações brasileiras.

Para a safra 2007/2008 tem-se uma estatística do Complexo Soja levantada pela Abiove, com base nos números divulgados pelo SECEX que estima: (valores em 1000 toneladas).

| | |
|---------------|----------------------------------|
| GRÃO: | 35.672 – aquisição de grãos |
| | 17.313 – processamento |
| | 6.213 – exportação da indústria |
| | 4.863 – vendas (mercado interno) |
| FARELO: | 13.264 – produção |
| | 21 – importação |
| | 7.578 – exportação |
| | 5.352 – consumo interno |
| ÓLEO DE SOJA: | 3.319 – produção |
| | 2 – importação |
| | 1.314 - exportação |
| | 1.835 – consumo interno |

A soja é o quarto grão mais produzido no mundo, atrás do milho e arroz, sendo que 18% da produção da soja é utilizada para produção de óleo de soja, sendo que este é o óleo vegetal mais consumido no mundo, tendo 25% do mercado global.

O maior produtor de soja do mundo são os Estados Unidos. A posição de maior exportador mundial da commodity é disputada pelo Brasil, Estados Unidos e Argentina, onde encontram como maiores mercados a Ásia, China e União Européia.(ABIOVE)

Tabela 1.1 - Exportações do Complexo Soja – 1998 a 2007 (volume em 1000 toneladas)

| | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007(P) |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Soja em grão | 9288 | 8917 | 11517 | 15676 | 15970 | 19890 | 19248 | 22435 | 24956 | 26600 |
| Farelo de Soja | 10447 | 10431 | 9364 | 11271 | 12517 | 13602 | 14486 | 14422 | 12332 | 12700 |
| Óleo de Soja | 1359 | 1522 | 1073 | 1625 | 1934 | 2486 | 2517 | 2743 | 2419 | 2100 |

Fonte: SECEX

Elaboração: ABIOVE

(P) Previsão Abiove para o ano comercial (jan/fev/2007/2008)

1.1.1 Cultura da Soja no Rio Grande do Sul

A soja surgiu no RS no início do século passado e até 1950 foi muito utilizada em alimentação de suínos.

Ao longo da década de 90 a produção gaúcha apresentou grande variabilidade, oscilando crescimento e decréscimo. A área plantada tem apresentado pouca variação e a quantidade produzida tem sofrido influência do rendimento de cada safra, associado à tecnologia empregada na lavoura e as condições climáticas do ano.

Atualmente a cultura detém a maior área de plantio no Rio Grande do Sul, que tem oscilado ao redor de três milhões de hectares. Salienta-se que a soja participa da economia de pequenos, médios e grandes estabelecimentos rurais do Estado, que é o terceiro maior produtor de soja, contribuindo com 16,8% do total produzido no país.

1.1.2 Caracterização da soja

A Soja é cultivada como alimento tanto para humanos quanto para animais. Pertence a família Fabaceae (leguminosas), contém quantidades significativas de todos os aminoácidos essenciais que devem ser providos ao corpo humano através de fontes externas, é rica em proteínas, lipídeos (gorduras), fibras e algumas vitaminas e minerais. Contém uma classe de fito-hormônios (hormônio de origem vegetal) conhecidos como isoflavonas ou isoflavonóides. Estas substâncias atuam como elemento anti-oxidante reduzindo as taxas do colesterol ruim (LDL), diminuindo o risco de doenças cardiovasculares também equilibram a quantidade do hormônio estrógeno, amenizando os sintomas da menopausa.

A composição média de um grão de soja em geral é: 65% de matéria sólida; 10% de água; 18% de óleo. A matéria sólida do grão de soja é: de 8% à 10% de água; 17% à 20% de

óleo; 38% à 40% de substâncias nitrogenadas (proteínas); 26% à 29% de substâncias não nitrogenadas (carboidratos); 5% de fibra bruta (celulose) e 5% de cinzas. O grão de soja possui aproximadamente uma massa específica de $1,25 \text{ g/cm}^3$ no seu estado natural.

Tabela 1.2 – Composição média (%) do grão de soja e de seus componentes.

| | Casca | Cotilédones | Hipocótilo | Grão de Soja |
|------------|-------|-------------|------------|--------------|
| Proteína | 8,8 | 42,8 | 40,8 | 40,3 |
| Óleo | 1,0 | 22,8 | 11,4 | 21,0 |
| Minerais | 4,3 | 5,0 | 4,4 | 4,9 |
| Açúcares | 8,6 | 29,4 | 43,4 | 33,8 |
| Rendimento | 7,3 | 90,3 | 2,4 | 100 |

Fonte: Smith&Circle(1972)

O óleo presente nos grãos de soja em teores adequados (20%) fornece as calorias necessárias ao organismo, apresentando alta digestibilidade, não contendo colesterol, ao contrário das gorduras de origem animal. Contém boa composição de minerais.

Tabela 1.3 – Concentração de minerais nos grãos de soja e percentual das necessidades nutricionais recomendadas.

| MINERAIS | Necessidade diária (mg/d) | mg/100g | RDA*(%) |
|----------|---------------------------|-------------|---------|
| Cálcio | 0,8 | 0,16 – 0,47 | 39 |
| Fósforo | 0,8 | 0,42 – 0,82 | 77 |
| Magnésio | 0,4 | 0,22 – 0,24 | 66 |
| Zinco | 1,5 | 0,37 | 24 |
| Ferro | 1,0 | 0,9 – 1,5 | 120 |

*Baseado na “Dose Diária Recomendada”(RDA) do Food and Nutritional Board, N.A.S.(USA) para homens adultos (22-35 anos; peso=70Kg). Fonte: Smith&Circle(1972).

1.1.3 Derivados da soja

O óleo de soja é o principal derivado da produção de soja, sendo que também podemos destacar como derivados os seguintes itens destacados no esquema abaixo.

1.1.4 Soja transgênica e orgânica

A soja é uma das plantações que estão sendo geneticamente modificadas em larga escala, e a soja transgênica está sendo utilizada em um número crescente de produtos. Atualmente, 80% de toda soja cultivada para o mercado comercial é transgênica.

Os melhoramentos trazidos pela soja transgênica beneficiam principalmente os produtores, em um futuro próximo permitirão incorporar novas características aos produtos finais, por exemplo, na qualidade do processamento do óleo, que serão fundamentais para a competitividade do complexo. O cultivo de soja transgênica diminui o custo da produção, visto que se torna desnecessário o uso de defensivos.

No sentido de criar novos cultivares com características diferenciadas. Os genes das plantas originais são modificados a fim de se obter maior rendimento, por exemplo, na extração de óleo, ou maior resistência a doenças.

A área cultivada com orgânicos no Brasil vem crescendo sensivelmente nos últimos anos. O produto orgânico é produzido sem a utilização de defensivos agrícolas e adubos químicos, tem como princípio o respeito a natureza e usa técnicas agrícolas que preservem o meio ambiente e seus recursos naturais, produzindo alimentos saudáveis. Como técnicas empregadas destacam-se a rotação de culturas, a adubação verde e o controle biológico de pragas.

A soja orgânica é um desses produtos que vem conquistando consumidores europeus e, mais recentemente, brasileiros. É cultivada livre de produtos químicos e é um bom investimento para pequenos produtores, pois é comercializada por um preço superior a soja convencional. O custo da produção é menor e principalmente proporciona inúmeros benefícios para o meio ambiente.

1.1.5 Perspectivas para o cultivo da soja

Realizando uma análise prospectiva sobre o dinâmico agronegócio da soja brasileira e tomando como referência a realidade atual é pertinente afirmar que o consumo e a demanda de soja no mundo crescerão, pois a população humana continuará crescendo, o poder aquisitivo continuará incrementando-se, destacando na Ásia que é o maior potencial de consumo da oleaginosa. O consumo de farelo de soja se manterá em alta devido ao consumo de carne suína e de frango. Crescerão também os usos industriais não tradicionais da soja, como biodiesel, tintas, vernizes, entre outros.

Políticas oficiais deverão estimular o enorme aproveitamento potencial produtivo do País para alavancar o consumo interno. O protecionismo e os subsídios da soja tenderão a diminuir, aumentando os preços internacionais que estimularão a produção e as exportações

brasileiras. A produção dos nossos principais concorrentes tenderá a estabilizar-se por falta de área disponível para expansão em seus territórios visto que suas fronteiras agrícolas estão quase esgotadas, e o cenário brasileiro apresenta as melhores condições de expansão, pois possui áreas ainda virgens e aptas para incorporação do processo produtivo da soja. Pode-se estimar que a produção da oleaginosa no País se concentrará cada vez mais nas grandes propriedades do centro-oeste, em detrimento das pequenas e médias propriedades da Região Sul, cujos proprietários, por falta de competitividade na produção de grãos, tenderão a migrar para atividades mais rentáveis com uso de mão de obra, pois a terra é recurso escasso.

O Brasil figura como o país que apresenta as melhores condições para expandir a produção da oleaginosa soja e promover aumento da demanda mundial pois possui áreas ainda virgens e aptas para incorporação do processo produtivo da soja. Em outros países produtores da soja o cenário não é o mesmo pois suas fronteiras agrícolas estão quase esgotadas.

Na safra 2006/2007 a cultura da soja alcançou um resultado significativo e compensador. Apesar de ter ocorrido uma queda na área plantada de 9,1%, a produtividade cresceu 16,7%. De todo o volume de grãos produzido no Brasil, a soja representa 44%. Os preços tendem a subir em virtude da oferta estar reduzida, visto que a demanda de consumo cresce 5% ao ano. A demanda em função do crescimento populacional, em torno de 17%, aumenta o consumo de alimento e energia.

O Brasil juntamente com a Argentina são responsáveis por 80% da produção mundial de soja. Os Estados Unidos, maior produtor de soja do mundo, reduziu sua área de soja plantada para a cultura do milho, visando atender o consumo de etanol.

O futuro da soja brasileira dependerá da sua competitividade no mercado global, que necessitará de empenho do produtor e apoio governamental em vias de escoamento da produção e avanços científicos com disponibilização de tecnologias ao setor produtivo.

1.2 Questão ambiental

Para desenvolver um ritmo de produção crescente, sempre considerando as necessidades socioambientais, é necessário produzir com boas práticas agrícolas dentro dos padrões econômico, social e ambiental. É fundamental que o cultivo da soja seja realizado respeitando a natureza e a sociedade local.

A principal fonte de aumento do aquecimento global é o atual modelo de desenvolvimento apoiado fortemente nos combustíveis fósseis.

Devido a questão ambiental estão sendo realizadas várias pesquisas para a utilização da soja como componente que substitui derivados do petróleo, com a vantagem de ser menos poluente, biodegradável e uma fonte renovável de energia, o Biodiesel.

1.2.1 Importância e benefícios do Biodiesel

Três motivações distintas para aumento da participação de biocombustíveis na matriz energética:

- Energética (redução da dependência em relação ao óleo diesel, visto que parte dele ainda é importada para suprir a demanda interna).
- Ambiental (melhoria na qualidade do ar, especialmente dos grandes centros urbanos, a partir da aditivação do diesel mineral com um produto renovável e menos poluente).
- Social (possibilidade de agregação de renda e geração de postos de trabalho no meio rural, especialmente nos estabelecimentos de agricultura familiar).

A soja se afigura como uma das grandes opções para estimular o início de um programa ambicioso de obtenção de biocombustíveis. Além da extensão de área e da escala de produção, a cadeia produtiva da soja é altamente organizada, a ligação com o mercado internacional é poderosa, a formação de preços é muito transparente e as possibilidades de acomodação de pressões demandam em função da capacidade de oferta brasileira, são altamente otimistas. A soja pode ser considerada a cunha que permitirá a abertura do mercado de biocombustíveis baseados em óleos vegetais, por cuja trilha, ingressarão produtos de maior eficiência energética, como é o caso do girassol e da canola.

O Cenário Brasileiro é altamente favorável a produção de biodiesel em larga escala, pois, segundo Bernardes, possui consolidação da produção massiva de etanol, produção de oleaginosas, disponibilidade de terras, desenvolvimento do setor extrativo de óleos vegetais, aceitação do consumidor, consumo elevado de diesel e potencial de exportação de biodiesel para mercado externo.

Os impactos positivos dessa evidente ampliação do mercado de biodiesel no Brasil devem se estender a diversos segmentos, sendo um o setor de produção de óleo (extração e refino). Conseqüentemente será necessário um aumento da eficiência da extração de óleo, ou seja, maior rendimento e menor custo, tornando assim mais viável o biocombustível.

MARCOS NO DESENVOLVIMENTO DO BIODIESEL

- 1960/70: Registros de estudos sobre produção de biodiesel no mundo (BR)
- 1980: Depositada 1ª Patente Biodiesel no Brasil – Dr Expedito Parente
- 1988: Início da produção de biodiesel Austria e França
- 1997: EUA – Congresso aprova biodiesel como combustível alternativo
- 1998: Setores de P&D no Brasil retomam os projetos para uso do Biodiesel
- 2002: Alemanha ultrapassa a marca de 1 milhão ton/ano de produção

-12/2003: DECRETO do Governo Federal Institui a Comissão Executiva Interministerial (CEI) e o Grupo Gestor (GG) encarregados da implantação das ações para produção e uso de BIODIESEL

- 06/12/2004: Lançamento do Programa de Produção e Uso do Biodiesel:

- Marco Regulatório

O biodiesel passa a fazer parte oficialmente da matriz energética brasileira a partir da lei 11.097, de 13 de janeiro de 2005 que institui o biodiesel no Brasil. A mistura aprovada para ser utilizada facultativamente até 2008 é de 2%. A partir de 2008 essa mistura ao diesel será obrigatória, passando a ser facultativa a mistura de 5%.

O biodiesel insere-se na matriz energética brasileira a partir da criação de seu marco regulatório, através da lei 11.097/2005, publicada no Diário Oficial da União em 13/01/2005.



Figura 1.2 – Marco Regulatório do Biodiesel

Segundo Parente o biodiesel é:

Um combustível renovável, biodegradável e ambientalmente correto, sucedâneo ao óleo diesel mineral, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação da transesterificação de qualquer triglicerídeo com álcool de cadeia certa, metanol ou etanol respectivamente (2003, seção 2).

O Biodiesel pode tornar-se uma commodity de ampla demanda internacional, pois oferece uma oportunidade para a integração entre indústria, agricultura familiar e combate a pobreza. Tudo isso ao lado da conquista de novo padrão energético: sustentável, ambientalmente responsável e economicamente dinâmico.

Segundo Gazzoni, as perspectivas para o biodiesel são ilimitadas. Os investimentos estão cada vez mais visíveis. A soja é uma oleaginosa que possui teor de óleo relativamente baixo, porém, é a oleaginosa mais plantada no mundo. Trata-se de uma cultura com maior organização da cadeia produtiva, com sistema de produção denominado mercado estabelecido

e diversificado, condições de clima e solo. Porém, outras oleaginosas vêm sendo estudadas, como o girassol, mamona, dendê e canola para a produção de biocombustíveis.

Segundo Thame, a produção de biocombustíveis é uma das alternativas para substituir a base energética, hoje baseada no uso de combustíveis fósseis. Além de não renováveis, esses combustíveis aumentam a poluição no ambiente, o aquecimento global e o efeito estufa.

A obtenção de biodiesel a partir de óleos vegetais já se encontra largamente utilizada na Europa e nos EUA. A Alemanha também é o maior produtor mundial de biodiesel.

Para realizar a substituição do combustível, é necessária a produção de óleo vegetal em larga escala. No Brasil, a produção de soja deverá continuar crescendo para atender a demanda por biocombustíveis e por alimentos. Em 2008 haverá uma necessidade de produção de 800 milhões de litros de biodiesel para atender à demanda de B2, adição de 2% de biocombustível ao óleo diesel.

Segundo Dall’Agnol, pesquisador da Embrapa Soja, em 2006 o Brasil produziu 196 milhões de litros de biocombustível, onde 80% de soja e 20% de oleaginosas como mamona e girassol. Em 2007, a soja foi responsável por 90% dessa produção, tendo a manter-se como a principal matéria-prima.

1.3 Óleo de soja

A indústria de óleos vegetais ocupa um lugar estratégico no contexto da indústria alimentícia, pois elabora um produto para consumo final e é um insumo fundamental para a indústria de alimentos. Há uma maior relevância dos óleos vegetais, em relação aos grãos, em termos de valor agregado pela importância no mercado mundial. Os óleos vegetais mais consumidos são: soja, palma, canola, girassol, amendoim, algodão, coco, milho, oliva, gergelim, arroz e uva.

A história dos óleos vegetais no Brasil foi marcada por épocas distintas, onde na fase pioneira dos anos 50 predominou o óleo de algodão, na década de 60 predominou o uso do óleo de amendoim e a partir de 1972 surgiu a cultura da soja.

Os óleos são alimentos energéticos, pois fornecem 9,5 kcal/g quando metabolizado no organismo humano enquanto os carboidratos e proteínas cerca de 4 kcal/g. São fontes de vitaminas e de ácido linoléico.

O óleo de soja é o mais utilizado pela população mundial no preparo de alimentos, sendo também usado em rações animais.

1.3.1 Extração de óleos

Evolução dos métodos de extração:

- Indústria caseira: milhares de anos A.C.
- Prensas hidráulicas: início do século XIX.
- Prensa contínua: fim do século XIX. Em 1904 ANDERSON construiu o “expeller”.
- Extração mista: prensagem da semente com “expeller” seguida por uma etapa de extração com solvente.
- Extração por solvente contínuo

O solvente mais usado na indústria é o hexano, um derivado do petróleo, que possibilita a extração da quase totalidade do óleo deixando um resíduo desengordurado denominado farelo.

O hexano tem ponto de ebulição entre 60°C e 80°C. Este solvente possui grande afinidade com o óleo dissolvendo-o, não interage com outras substâncias presente nos grãos, é imiscível em água e tem baixo calor latente de ebulição, porém possui alta inflamabilidade, auto custo e toxicidade. Este produto é importado e durante a extração ele precisa ser recuperado por destilação, viabilizando seu uso apenas em grande escala.

Para matérias-primas com altos teores de óleo (mais de 30%) usa-se o processo de prensagem, enquanto que aquelas que possuem teores menores de óleo usam-se a extração por solvente. Na extração por prensagem o teor de óleo residual da matéria-prima é da ordem de 10% e na por solvente pode ser reduzido a menos de 1%.

O sistema de extração opera em contra corrente, fazendo com que o solvente puro encontre a torta mais pobre em óleo e vice-versa. A temperatura ideal para extração fica em torno de 55°C a 65°C, abaixo de 55°C não há absorção perfeita do óleo e acima de 60°C ocorre evaporação do solvente.

A concentração de micela que sai do extrator é de 30% de óleo aproximadamente.

1.3.2 Soja laminada e soja extrusada

A soja laminada é obtida através dos grãos de soja que, submetidos a tratamento térmico são polidos, pré moídos e laminados garantindo assim a eliminação do gosto ruim proveniente da hipoxinase.

O óleo de soja está contido em “bolsões” e em capilares fibrosos e a laminação faz com que ocorra o rompimento destes bolsões, facilitando a extração do óleo presente.

A laminação é feita em laminadores que possuem dois cilindros lisos de velocidade diferenciada e sentidos opostos visando a obtenção de flocos com espessura na faixa de 0,25mm e 0,35mm, gerando em média uma área de 1,5 cm^2 de superfície. A espessura dos

flocos e seu tamanho são de extrema importância, pois são eles que vão determinar principalmente as características de velocidade de extração, percolabilidade, retenção estática e drenabilidade.



Figura 1.3 – Equipamento utilizado para laminação

A extrusão foi inventada no Brasil pelo engenheiro químico Carlos Sorgi e aplicada em larga escala pela primeira vez nos EUA em 1976. Ao final de 1980 mais de 60% dos grãos de soja eram extraídos por este processo.

Este método consiste basicamente em comprimir o material moído de modo a provocar uma difusão uniforme da água em toda a massa e permitir a descompressão do material.

O extrusor transforma a soja laminada em um meio poroso mais denso e ao mesmo tempo com maior permeabilidade e extratibilidade. Esse equipamento possui semelhança com um moedor de carne gigante tendo um corpo tubular com helicóides e parafusos raspadores. Neste equipamento a soja floculada, a medida que se movimentava, aumenta a pressão dentro da matéria-prima. Em determinados pontos, injeta-se vapor d'água ($\approx 150^{\circ}\text{C}$), penetrando facilmente a matéria-prima e devido à grande pressão, condensa-se com água no estado líquido. A pressão aumenta atingindo seu ponto máximo onde é bruscamente liberada. A água evapora-se rapidamente e promove a formação de uma massa porosa, expandida que facilita a percolação e melhora a extratibilidade.



Figura 1.4 – Equipamento utilizado para extrusão

1.3.3 Vantagens da extrusão se comparado com a laminação

A extrusão apresenta algumas vantagens, sendo algumas citadas a seguir:

- A densidade aumenta de 300 kg/m^3 para 550 kg/m^3 de massa laminada.
- A área de contato sólido líquido no extrator aumenta, aumentando assim a taxa de percolação.
- Aumenta a eficiência nos primeiros estágios da extração, aumentando a concentração de óleo na micela.
- Reduz em pelo menos 5% o consumo de solvente na saída do extrator e conseqüentemente menor consumo de vapor no dessolventizador.
- Reduz a quantidade de solvente na torta.
- Reduz o consumo de energia.
- Aumenta a homogeneidade do produto.
- Reduz a quantidade de sólidos extraídos, facilitando a filtração do óleo, promove um aumento na quantidade de fosfatídeos hidratáveis,, facilitando a etapa de degomagem.

1.4 Principais processos para extração de óleo

Há três tipos de processos para extração de óleo:

Prensagem: utiliza prensas contínuas de alta pressão que podem ser usadas com pequenas e rápidas adaptações, para vários tipos de oleaginosas. Consiste em chapas de metal, que comprimem a matéria-prima, extraindo o óleo contido nelas. Este processo é pouco utilizado para a soja, por ser totalmente ultrapassado, deixando alto residual de óleo na torta consumindo muita energia e mão-de-obra.

Misto descontínuo: é passível de ser adaptado para várias oleaginosas e consiste na combinação entre prensagem e o sistema de solvente. Este processo possui rendimento maior que o de prensagem, com menor gasto de energia e menor residual de óleo no farelo. Ainda é utilizado por muitas empresas de pequeno e médio porte. Após a prensagem pode ocorrer dois métodos: de enriquecimento ou de infusão.

Solvente contínuo: é o processo mais eficiente, principalmente para oleaginosas que não apresentam alta concentração de óleo, pois aumenta o rendimento de óleo na extração de soja, proporcionando economia de energia, de consumo de solvente e mão-de-obra. Este processo é utilizado pela maioria.

1.4.1 Preparação da soja para extração

A preparação das sementes para a extração por solvente, é uma sequência de operações com objetivo de trabalhar o material a ser extraído, dando-lhe características adequadas. O esquema a seguir, mostra esta sequência de operações.

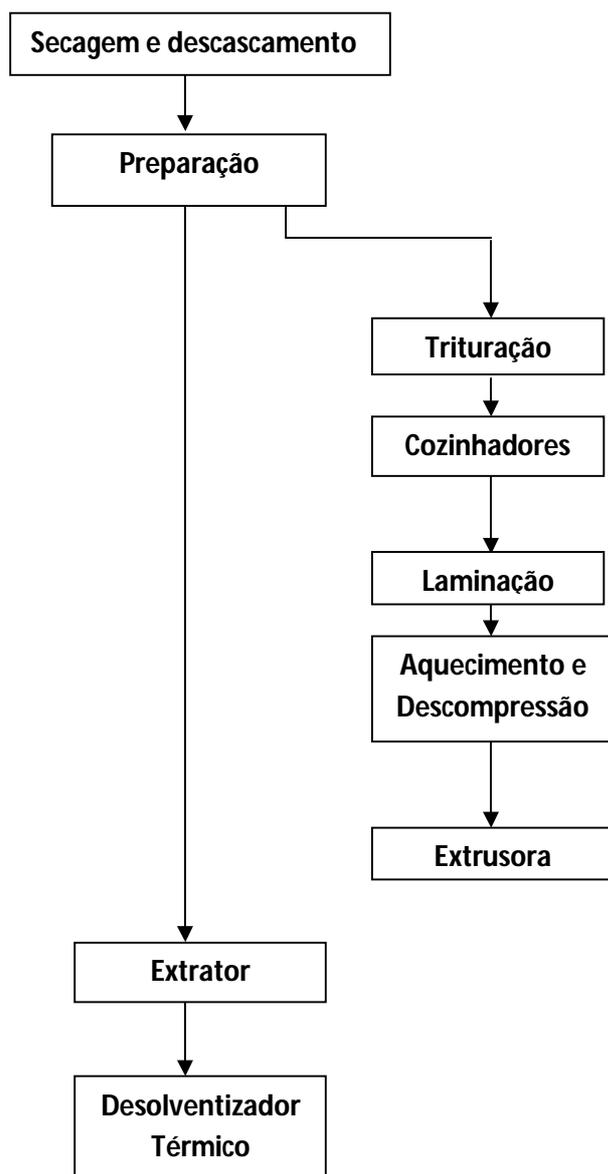


Figura 1.5 – Esquema dos processos da extração de óleo de soja.

- Secagem – reduz a umidade das sementes.
- Descascamento – é a retirada da camada superior da semente de soja para um aumento proporcional na capacidade de extração, pois haverá uma redução na quantidade de material a ser extraído e uma menor perda de óleo no farelo.
- Preparação – reduz o tamanho da semente e rompe todas as suas células.

-trituração – o grão é quebrado em aproximadamente 6 partes.

-cozinhamento – tem como objetivo dar à massa certa plasticidade, permitindo a laminação posterior; permitir a formação posterior de flocos; provocar a liberação de óleo na massa; possibilitar a coagulação de certos componentes protéicos.

-laminação – é feita em laminadores de rolos lisos com velocidades diferenciadas, visando a obtenção de flocos com 10-12 milésimos de polegada; determinação da velocidade de extração, percolabilidade, retenção estática e drenabilidade.

-aquecimento e descompressão – o material sofre um aquecimento e uma súbita descompressão ocorrendo assim um total rompimento das células.

-extrusora – tem por objetivo diminuir o tamanho e volume da massa.

- Dessolventizador térmico – ocorre a separação da micela que restou na massa.

Este conjunto de operações realizadas na preparação da semente para a extração é de suma importância, pois:

- ocorrerá uma maior extratibilidade com menor teor de óleo residual e conseqüentemente maior rendimento;
- se a velocidade de extração for maior, menor será o tamanho do extrator ou maior será sua capacidade;
- se a velocidade de drenagem for maior, menor será o ciclo de drenagem e maior será a utilização do extrator;
- se a percolabilidade for maior, haverá uma quantidade maior de solvente em contato com a matéria-prima, com aumento de extração.

1.5 Modelos Matemáticos aplicados à Extração

Neste item será apresentado alguns modelos matemáticos existentes que dedicaram-se ao estudo da extração de óleo vegetal.

1.5.1 Modelo do tipo “Rotocell”

O aplicativo e modelo matemático para o Rotocell foi desenvolvido por THOMAS (1999). O esquema físico foi elaborado considerando o modelo de leito fixo de MAJUMDAR, et al., 1995 e MOREIRA, 1998.

Neste modelo foram considerados alguns fenômenos, como: o processo de carregamento da matéria-prima com micela forte; drenagem da micela na saída do extrator; difusão do óleo na fase “bulk” considerando direção vertical; transferência do óleo da fase poro para a fase “bulk” e da fase sólida para a fase poro; fluxo CCC; distribuição não uniforme das concentrações de óleo; regime transiente.

Também foi levado em consideração algumas hipóteses como a de que a micela forte na etapa de carregamento preenche instantaneamente os espaços dentro das partículas e entre as partículas mas não ocorre transferência de massa; durante o preenchimento da fase poro ocorre equilíbrio entre fase sólida e poro; a concentração poro é uniforme; a temperatura é uniforme; cada vagão é um conjunto de colunas verticais sem transferência de massa; o óleo que sai das partículas, é substituída por hexano; as porosidades “bulk” e poro, e a velocidade e a viscosidade são constantes; a difusão “bulk” é considerada somente ao longo de cada coluna da seção.

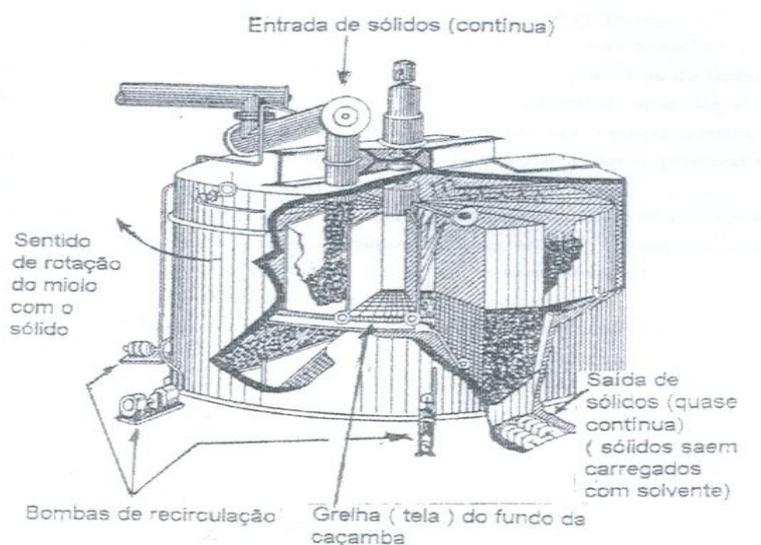


Figura 1.6: Esquema do extrator “Rotocell”.

Este modelo é considerado bastante complexo, assim como as condições de contorno, pois possui equações em derivadas parciais, e peculiaridades do sistema de fluxos contra corrente cruzados. As equações utilizadas são as seguintes:

- Equação da continuidade do óleo na fase “bulk”:

$$\frac{\partial C_j}{\partial \tau} = - \frac{\partial UC_j}{\partial z} + D_{AB} \frac{\partial^2 C_j}{\partial z^2} + \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} k_f a_p (C_p - C) \quad (1.1)$$

- Equação da continuidade do óleo na fase poro:

$$\frac{C_{pj}}{\partial \tau} = - \frac{k_f a_p}{\varepsilon_p + (1-\varepsilon_b)E_d} (C_p - C) \quad (1.2)$$

- Equação da concentração média do reservatório de micela:

$$\frac{d\bar{C}_m}{d\tau} = \frac{U_m A_v \varepsilon_b}{V_b} \left(\sum_{j=2(m-2)p+1}^{j=2(m-1)p} C_j(L_s) - 2\bar{C}_m \right) \quad (1.3)$$

sendo: a_p a área de contato da partícula de matéria-prima, C_j a concentração do óleo na fase “bulk”, C_p a concentração do óleo na fase poro, \bar{C}_m a alteração da concentração na bolsa da seção “m”, D_{AB} o coeficiente de difusividade, E_d a constante de equilíbrio entre as fases sólida e poro, ε_b a porosidade “bulk” da matéria-prima, ε_p a porosidade poro da matéria-prima, k_f o coeficiente de transferência de massa, τ o tempo, U a velocidade da micela por seção de lavagem, V_b o volume de qualquer bolsa, z a coordenada vertical do leito.

Para a resolução dessas equações formadas por ((1.1) (1.2) (1.3)) foi aplicado o método de linhas para semi-dicretização, encontrado em LAMBERT (1993), e resolvida com o método de Runge-Kutta.

1.5.2 Modelo evolutivo 2D para instalação industrial “De Smet”

Este modelo foi desenvolvido por VELOSO (1999), que descreveu o extrator “De Smet”, como sendo do tipo longo, na horizontal, formado por um grupo de chapas de seção retangular, com uma tremonha de entrada e outra de saída. Não possui divisões, a matéria-prima é transportada em uma esteira de tela de aço inoxidável, apoiada em roletas laterais. Utiliza o método de lavagem por percolação para realizar a extração, onde a micela é drenada por gravidade.

A matéria-prima entra enchendo o corpo do extrator e sobe através da tremonha até por volta de 2 metros de altura, próximo da superfície superior do extrator. Os níveis de matéria-prima são mantidos constantes, existindo na entrada do extrator uma comporta que

regula a altura da massa. Em cada seção são aplicados rastelos para tornar a massa mais permeável e permitir uma melhor percolação.

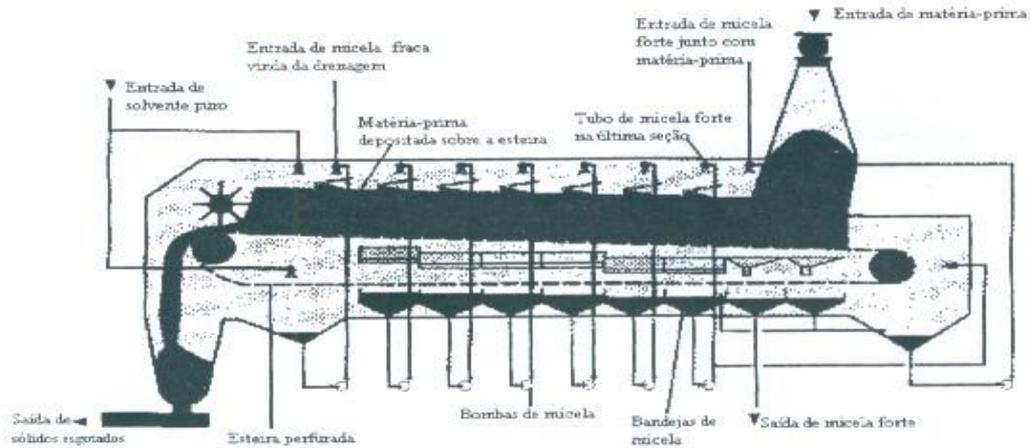


Figura 1.7: Esquema do extrator “De Smet”.

O modelo físico admite na seção de carregamento, a paralização dos processos de transferência de massa; as porosidades ε_b e ε_p são constantes durante a extração; a concentração de óleo é uniforme; a difusão na fase “bulk” ocorre nas direções vertical e horizontal; não existe separação física entre as seções; a viscosidade da micela é constante; as concentrações nas fases sólida e poro estão em equilíbrio; paredes celulares da matéria-prima estão totalmente rompidas; a velocidade da micela é constante.

As equações do modelo matemático, utiliza o tratamento clássico para misturas em escoamentos multifásicos.

- Equação para a alteração de concentração do óleo na fase “bulk”.

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -V_m \frac{\partial C}{\partial z} + D_{AB} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} k_f a_p (C_{pj} - C_j) - \theta u \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1.4)$$

- Equação para a alteração da concentração do óleo na fase poro.

$$\frac{\partial C_p}{\partial \tau} = - \frac{k_f a_p (C_{pj} - C_j)}{\left[1 + \frac{(1-\varepsilon'_p)}{\varepsilon'_p} E_d \right] \varepsilon'_p} - \frac{u \frac{\partial C_p}{\partial x}}{\left[1 + \frac{(1-\varepsilon'_p)}{\varepsilon'_p} E_d \right]} \quad (1.5)$$

onde:

$$\varepsilon'_p = \varepsilon_p + (1 - \varepsilon_b) E_d$$

- Equação da alteração das concentrações nas bandejas:

$$\frac{d\bar{C}_m}{d\tau} = \frac{\int_{(m-1)X_S}^{mX_S} C_m(x, L_S, \tau) V_m dx - \bar{C}_m X_S V_{m-1}}{\bar{V}_b}, \quad m = 2, \dots, m_S \quad (1.6)$$

onde: m_S é o número de seções do extrator, X_S é a largura de uma seção na direção horizontal, V_b é o volume das bandejas de óleo, x é a coordenada horizontal do leito, z é a coordenada vertical do leito, V_m é a velocidade da micela por seção de lavagem, C_m é a concentração média de óleo na m -ésima bandeja, L_S é a altura do leito, τ é o tempo, E_d é o coeficiente de equilíbrio entre as fases sólido e poro, D_{AB} é o coeficiente de difusividade, a_p é a superfície da partícula onde ocorre a transferência de óleo, ε_b é a porosidade do leito, ε_p é a porosidade da partícula e ε'_p é a porosidade efetiva da partícula.

Para a semi-discretização das equações foi aplicado o método de linhas e para a resolução foi utilizado o método de Runge-Kutta.

1.5.3 Modelo do extrator “Crown-Model”

Este modelo foi desenvolvido por BENETTI (2001) que descreve o extrator “Crown-Model”



Figura 1.8: Extrator “Crown-Model”.

A matéria-prima é carregada no extrator, extrusada e transportada continuamente em volta do circuito pela fita do transportador no sentido horário. O hexano entra continuamente no trecho inferior na seção de lavagem e prossegue na direção anti-horária impregnando-se com óleo. Os flocos que entram na primeira seção do extrator são lavados com micela forte, preenchendo os espaços entre e dentro das partículas da matéria-prima. Em cada seção de lavagem ocorre a transferência de óleo da fase sólida para à fase poro e da fase poro para a fase “bulk”, onde ao mesmo tempo, surge os fluxos contrários do hexano.

Na seção de drenagem a micela fraca cai no fundo da última bandeja. O hexano das fases sólida e poro retornam ao extrator após passar pelo desolventizador e evaporizador e o óleo dessas fases considera-se perdido. A matéria-prima esgotada é descarregada pela fita do transportador. A corrente continua se movimentando, vazia, na direção da entrada, onde é recarregada.

Admite os seguintes fenômenos: fluxos contra-correntes cruzados; distribuição bi-dimensional das concentrações C, C_p, C^N ; o deslocamento dos fluxos na direção horizontal; difusão ocorrem nas direções vertical e horizontal; na seção de carregamento, a micela forte preenche todos os espaços; retorno do hexano no extrator; regime transiente; alteração da viscosidade μ e da densidade ρ da micela; cinética da extração; possibilidade dos fluxos adicionais da micela; coleta e saída da micela em bandejas.

As hipóteses são as seguintes: na etapa de carregamento não ocorrem transferência de massa; a quantidade do óleo que sai substitui-se por hexano; a micela nos trechos horizontais fica acima da superfície da matéria-prima; em cada bandeja a concentração do óleo é uniforme; na drenagem o líquido da fase “bulk” cai no fundo da última bandeja; o óleo das fases poro e sólida que entra na zona de drenagem considera-se perdido; a temperatura é uniforme; as paredes celulares das partículas estão rompidas; as porosidades ε_b e ε_p são constantes; nos trechos horizontais as velocidades verticais é uniforme; a velocidade do transportador u é constante; o movimento horizontal da micela possui a velocidade constante e uniforme.

O campo de extração do extrator “Crown-Model” possui três partes:

- trecho horizontal superior com coordenadas cartesianas x_a e z_a ;
- trajeto conexivo com coordenadas cilíndricas r e θ .
- trecho horizontal inferior com coordenadas cartesianas x_c e z_c ;

Equação para alteração da concentração do óleo na fase “bulk”.

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \delta V_m \frac{\partial C}{\partial z} + E_S \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} k_f a_p (C_p - C) - u_m \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1.7)$$

Equação para alteração da concentração do óleo na fase sólida.

$$\frac{\partial C^N}{\partial \tau} = -k_N (C^N - E_d C_p) - u \frac{\partial C^N}{\partial x} \quad (1.8)$$

Equação para alteração da concentração do óleo na fase poro.

$$\frac{\partial C_p}{\partial \tau} = \frac{(1-\varepsilon_p)}{\varepsilon_p} k_N (C^N - E_d C_p) \frac{k_f a_p (C_p - C)}{\varepsilon_p} - u \frac{\partial C_p}{\partial x} \quad (1.9)$$

Equações da concentração do óleo nas bandejas.

$$\frac{d\bar{C}_{m_2}}{d\tau} = \frac{\int_{(m_2-1)X_S}^{m_2 X_S} C(x_c, z_c, \tau) V_{m_2} dx_c + \int_0^{Lr} C(X_S, m_2, z_c, \tau) u_m \varepsilon_b dz_c - \bar{C}_{m_2} X_S V_{(m_2-1)}}{\bar{V}_b / H_L} \quad (1.10)$$

1.6 Métodos Numéricos

Os métodos numéricos são empregados para determinar soluções aproximadas para equações diferenciais parciais e ordinárias. Estes métodos consistem num processo de discretização das equações, reduzindo o problema físico, contínuo, com um número infinito de incógnitas para um problema discreto com um número finito de incógnitas que possa ser resolvido por alguma linguagem de programação de computador.

Os métodos numéricos geralmente não apresentam restrições, podendo resolver problemas com complicadas condições de contorno e apresentando resultados bastante precisos para aplicações.

Neste item, apresenta-se métodos numéricos para discretização de equações diferenciais parciais (EDP): diferenças finitas e volumes finitos.

1.6.1 Método das Diferenças Finitas

O método de diferenças finitas é de fácil compreensão e razoavelmente simples em seus conceitos e é de imediata aplicação. É um método preciso e robusto onde o comportamento da função é bem conhecido.

No método de diferenças finitas, as funções de argumentos contínuos, são aproximadas por funções definidas em um número finito de pontos dentro do domínio considerado.

A região de interesse é representada por uma série de pontos e nós, e a relação entre os valores nestes pontos é geralmente obtida através da expansão truncada em série de Taylor. A relação entre os valores nodais é obtida por meio de polinômios de interpolação válidos para cada sub-região ou elemento.

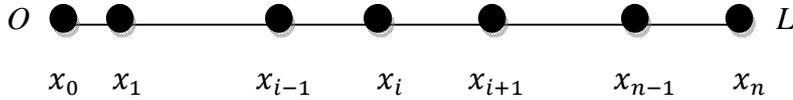
A teoria básica do MDF consiste na substituição das derivadas parciais da equação contínua por meio de fórmulas discretas de diferenças e na aplicação da equação resultante em um número finito de pontos da região, dando origem a um sistema de equações algébricas onde a solução fornece valores aproximados sujeitos a pequenos erros, porém usando passos de cálculos pequenos e um bom recurso computacional essa aproximação pode ser muito precisa.

A discretização é feita com auxílio de uma malha com espaçamento constante, porém podem ser usadas malhas irregulares.

Encontra-se, em CUMINATO, et al (2002), explicações que facilitam a interpretação das diferenças finitas, que são reproduzidas em parte, a seguir:

Temos a divisão do domínio $[O, L]$ em espaços Δx por pontos x_i , onde $i=0, 1, \dots, n$; determinando $\Delta x = \frac{L}{n}$ como sendo o tamanho do elemento.

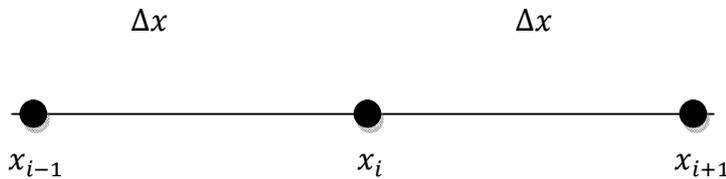
Representação do espaço unidimensional:



Levando em consideração a noção de limite, temos a variação de uma função $C_i \sim C(x_i)$ como sendo

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{C(x+\Delta x) - C(x)}{\Delta x} \quad (1.11)$$

A seguir, determinamos dois espaços Δx delimitados por três pontos nodais:



Conforme divisão anterior do intervalo, pode-se definir a função C segundo às seguintes relações:

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_i = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{C(x_{i+1}) - C(x_i)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{C(x_i) - C(x_{i-1})}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{C(x_{i+1}) - C(x_{i-1})}{\Delta x} \quad (1.12)$$

Realizando a expansão da Série de Taylor, para a primeira derivada, tem-se:

$$C(x) = \sum \frac{(x-x_i)^n}{n!} \left(\frac{\partial^n C}{\partial x^n}\right)_i \quad (1.13)$$

A partir da equação (1.13), se pode obter:

$$Q_1 : C_{i+1} = C_i + \Delta x \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_i + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)_i + \frac{(\Delta x)^3}{6} \left(\frac{\partial^3 C}{\partial x^3}\right)_i + \dots \quad (1.14)$$

$$Q_2 : C_{i-1} = C_i - \Delta x \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_i + \frac{(\Delta x)^2}{2} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)_i - \frac{(\Delta x)^3}{6} \left(\frac{\partial^3 C}{\partial x^3}\right)_i \dots \quad (1.15)$$

Pode-se estimar o erro local de truncamento a partir de uma expansão em Série de Taylor, onde são definidas algumas relações de diferenças finitas:

- Diferença progressiva com ELT $O[\Delta x]$

$$DP: \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_i = \frac{C_{i+1}}{\Delta x} - \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)_i - \frac{(\Delta x)^2}{6} \left(\frac{\partial^3 C}{\partial x^3}\right)_i + \dots \quad (1.16)$$

- Diferença regressiva com ELT $O[\Delta x]$

$$DR: \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_i = \frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)_i - \frac{(\Delta x)^2}{6} \left(\frac{\partial^3 C}{\partial x^3}\right)_i + \dots \quad (1.17)$$

- Diferença central com ELT $O[(\Delta x)^2]$

$$DP - DR: \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_i = \frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{2\Delta x} - \frac{(\Delta x)^2}{6} \left(\frac{\partial^3 C}{\partial x^3}\right)_i + \dots \quad (1.18)$$

Para definir a segunda derivada, usa-se a diferença centrada, onde tem-se:

$$\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)_i = \frac{C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x)^2 \quad (1.19)$$

Com o uso de ajustes polinomiais, tem-se algumas relações para aproximações de ordem superior.

- Diferença regressiva para a primeira derivada

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_i = \frac{2C_{i+1} + 3C_i - 6C_{i-1} + C_{i-2}}{2\Delta x} + O(\Delta x)^3 \quad (1.20)$$

- Diferença progressiva para a primeira derivada

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_i = \frac{-C_{i+1} + 6C_i - 3C_{i-1} - 2C_{i-2}}{6\Delta x} + O(\Delta x)^3 \quad (1.21)$$

- Diferença centrada para a primeira derivada

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_i = \frac{-C_{i+2} + 8C_{i+1} - 8C_{i-1} + C_{i-2}}{12\Delta x} + O(\Delta x)^4 \quad (1.22)$$

- Diferença centrada para a derivada segunda

$$\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)_i = \frac{-C_{i+2} + 16C_{i+1} - 30C_i + 16C_{i-1} - C_{i-2}}{12(\Delta x)^2} + O(\Delta x)^4 \quad (1.23)$$

Tendo difusão unidimensional, a discretização da equação ocorre usando-se o método explícito, onde:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1.24)$$

Sendo que para a segunda derivada tem-se:

$$\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)_i = \frac{C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}}{(\Delta x)^2} = \frac{\delta_x^2 C^n}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x)^2 \quad (1.25)$$

Onde o operador diferença central (δ^2) é dado por:

$$\delta_x^2 C_i^n = \delta_x(\delta_x C_i^n) = C_{i+1}^n - 2C_i^n + C_{i-1}^n \quad (1.26)$$

E aplicando-o na equação (1.23), tem-se:

$$\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)_i = \frac{-C_{i+2} + 16C_{i+1} - 30C_i + 16C_{i-1} - C_{i-2}}{12(\Delta x)^2} = \frac{\delta_x^2 C^n}{(\Delta x)^2 (1 + \delta_x^2/12)} + O(\Delta x)^4 \quad (1.27)$$

Chega-se a forma discretizada quando substituí-se (1.25) em (1.24):

$$\frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\Delta \tau} = D_x \frac{C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}}{(\Delta x)^2} \quad (1.28)$$

Para o método explícito de um passo de cálculo de primeira ordem resulta um ELT de $O[\Delta \tau, (\Delta x)^2]$ e a estabilidade do método é condicionada a $0 \leq \alpha \leq \frac{1}{2}$ onde $\alpha = \frac{D_x \Delta \tau}{(\Delta x)^2}$ é considerado como sendo o parâmetro difusivo.

1.6.2 Método dos Volumes Finitos

O método dos Volumes Finitos é baseado na forma integral ao invés da equação diferencial, as aproximações pontuais via formulação de diferenças finitas nos nós da malha são substituídos por divisões do domínio em volumes de controle (VC), chamados também de “volumes finitos”; onde é realizada uma aproximação da integral em C sobre cada VC. Dividindo-se o valor da integral pelo volume obtém-se a média de C no VC; onde estes são modificados em cada passo de tempo pelo fluxo que atravessa os extremos do VC.

O método de volumes finitos, num espaço unidimensional, é baseado na subdivisão da região de domínio em intervalos com volumes finitos, chamados células da malha e acompanhando o progresso da aproximação da integral de C sobre cada VC. Os valores são atualizados em cada passo de tempo, através das extremidades do VC, sendo usadas aproximações para o fluxo.

A i -ésima célula da malha é dada por:

$$C_i = (x_{i-1/2}, x_{i+1/2}) \quad (1.29)$$

Para aproximar o valor médio sobre o i -ésimo intervalo no instante t_n , tem-se a seguinte equação:

$$\bar{C}_i^n \approx \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} C(x, t_n) dx \equiv \frac{1}{\Delta x} \int_{C_i} C(x, t_n) dx \quad (1.30)$$

onde o comprimento da célula no VC é dado por:

$$\Delta x = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}$$

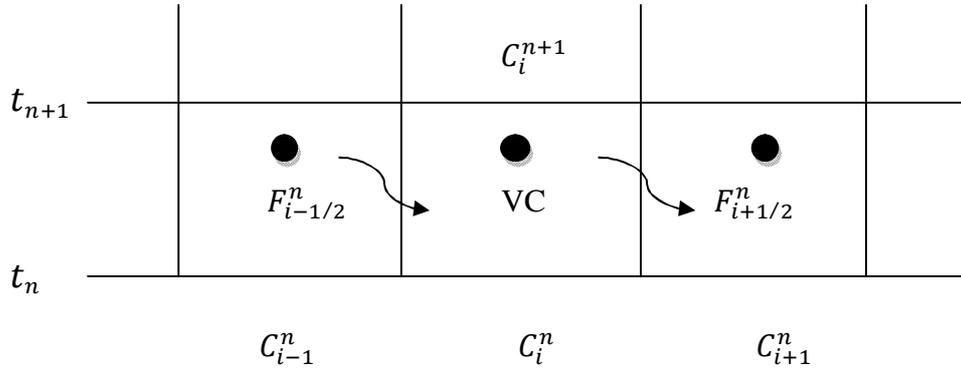


Figura 1.9 – Ilustração do MVF para obtenção das médias no VC \bar{C}_i^n usando os fluxos pelas extremidades da célula.

A equação (1.30) concorda com o valor de C no ponto médio do intervalo na $O(\Delta x)^2$, quando a função $C(x, t)$ é considerada suave. Partindo das fórmulas seguintes de expansão em séries de Taylor para a função C e suas n derivadas, tem-se o erro de truncamento da aproximação.

$$C(x) = C_i + C_i^t x + \frac{1}{2} C_i^{tt} x^2 + C_i^{ttt} x^3 + \dots \quad (1.31)$$

$$C^t(x) = C_i^t + C_i^{tt} x + \frac{1}{2} C_i^{ttt} x^2 + \frac{1}{6} C_i^{(iv)} x^3 + \dots \quad (1.32)$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$C^{(n)}(x) = C_i^{(n)} + C_i^{(n+1)} x + \frac{1}{2} C_i^{(n+2)} x^2 + \frac{1}{6} C_i^{(n+3)} x^3 + \dots \quad (1.33)$$

Realizando a subtração das expansões de Taylor escritas para $x_{i+1/2}$ e $x_{i-1/2}$; calcula-se as fórmulas de volumes finitos, onde tem-se:

$$\frac{C_d^{(n)} - C_e^{(n)}}{\Delta x} = C_i^{(n+1)} x + \frac{\Delta x^2}{2^2 3!} C_i^{(n+3)} + \frac{\Delta x^4}{2^4 5!} C_i^{(n+5)} + \frac{\Delta x^6}{2^6 7!} C_i^{(n+7)} + \dots \quad (1.34)$$

Quando $n = -1$, a média no VC é dado por:

$$\bar{C}_i = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} C(x) dx = C_i + \frac{\Delta x^2}{24} C_i^{tt} + \frac{\Delta x^4}{1920} C_i^{(iv)} \quad (1.35)$$

Para facilitar o uso de importantes propriedades da lei de conservação na dedução de métodos numéricos é conveniente trabalhar com médias nas células. Pode-se garantir que um método numérico é conservativo quando ele simula a solução verdadeira. Tem-se então que $\sum_{i=1}^N \bar{C}_i^n \Delta x$ aproxima a integral C sobre o intervalo $[a, b]$, onde varia por fluxos nos contornos $x=a$ e $x=b$, e a massa total dentro do domínio é preservada.

Forma integral da lei de conservação:

$$\frac{d}{dt} \int_{C_i} C(x, t) dx = f \left(C(x_{i-1/2}, t) \right) - f \left(C(x_{i+1/2}, t) \right) \quad (1.36)$$

Com esta equação é possível desenvolver um algoritmo explícito de marcha no tempo.

Realizando a integração da equação (1.36) no tempo de t_{n+1} e t_n , dividindo o resultado por Δx e reorganizando, obtém-se:

$$\frac{1}{\Delta x} \int_{C_i} C(x, t_{n+1}) dx = \frac{1}{\Delta x} \int_{C_i} C(x, t_n) dx - \frac{1}{\Delta x} \left[\int_{t_n}^{t_{n+1}} f \left(C(x_{i+1/2}, t) \right) dt - \int_{t_n}^{t_{n+1}} f \left(C(x_{i-1/2}, t) \right) dt \right] \quad (1.37)$$

Essa expressão nos dá a atualização, em um passo de tempo, da média de C no VC. Como $C(x_{i\mp 1/2}, t)$ varia ao longo do tempo em cada extremidade do VC, não é possível avaliar as integrais temporais pois não possuímos a solução exata.

A seguir tem-se formas de estudo dos métodos numéricos.

$$\bar{C}_i^{n+1} = \bar{C}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^n - F_{i-1/2}^n) \quad (1.38)$$

Sendo que:

$$F_{i-1/2}^n \approx \frac{1}{\Delta x} \int_{t_n}^{t_{n+1}} f \left(C(x_{i-1/2}, t) \right) dt \quad (1.39)$$

Pode-se obter um método discreto por completo se for possível aproximar o fluxo médio baseado nos valores de C_i^n .

Para obter $F_{i-1/2}^n$ com base apenas nos valores \bar{C}_{i-1}^n e \bar{C}_i^n (valores ponderados em cada um dos lados da interface), leva-se em consideração que em problemas hiperbólicos as informações se propagam com velocidade finita. Então:

$$F_{i-1/2}^n = F(\bar{C}_{i-1}^n, \bar{C}_i^n) \quad (1.40)$$

sendo F uma função de fluxo numérica.

Então o método fica:

$$\bar{C}_i^{n+1} = \bar{C}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [F(\bar{C}_i^n, \bar{C}_{i+1}^n) - F(\bar{C}_{i-1}^n, \bar{C}_i^n)] \quad (1.41)$$

A forma como é feita a escolha da fórmula F determina o método específico obtido. O valor de \bar{C}_i^{n+1} depende de três valores do intervalo de tempo anterior, \bar{C}_{i-1}^n , \bar{C}_i^n e \bar{C}_{i+1}^n . Efetuando a soma $\Delta x \cdot \bar{C}_i^{n+1}$ sobre todo o conjunto de VC's, tem-se:

$$\Delta x \sum_{i=I}^J \bar{C}_i^{n+1} = \Delta x \sum_{i=I}^J \bar{C}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^n - F_{i-1/2}^n) \quad (1.42)$$

Agora, considera-se a seguinte equação da difusão, onde o fluxo é:

$$f(C_x, x) = -D(x)C_x \quad (1.43)$$

Observando que os valores médios de \bar{C}_{i-1}^n e \bar{C}_i^n no VC, pode-se definir o fluxo numérico $F(\bar{C}_{i-1}^n, \bar{C}_i^n)$ na interface do VC como sendo:

$$F(\bar{C}_{i-1}^n, \bar{C}_i^n) = -D_{i-1/2} \left(\frac{\bar{C}_i^n - \bar{C}_{i-1}^n}{\Delta x} \right) \quad (1.44)$$

onde $D_{i-1/2} \approx D(x_{i-1/2})$ e $D_{i-1/2}$ é a medida da condutividade da interface.

A discretização padrão tipo diferenças finitas da equação da difusão é dada na aplicação da equação (1.44) em (1.41), resultando em:

$$\bar{C}_i^{n+1} = \bar{C}_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} [D_{i+1/2}(\bar{C}_{i+1}^n - \bar{C}_i^n) - D_{i-1/2}(\bar{C}_i^n - \bar{C}_{i-1}^n)] \quad (1.45)$$

Fazendo $D \equiv$ constante, tem-se:

$$\bar{C}_i^{n+1} = \bar{C}_i^n + \frac{D \Delta t}{\Delta x^2} (\bar{C}_{i+1}^n - 2\bar{C}_i^n + \bar{C}_{i-1}^n) \quad (1.46)$$

As equações parabólicas são estáveis somente quando $\Delta t = O(\Delta x^2)$.

Usando a relação (1.34) com $n = 1$ obtém-se um método explícito com termo difusivo determinado por um esquema de quarta ordem, onde:

$$\frac{C'_d - C'_e}{\Delta x} = C_i'' + \frac{\Delta x^2}{24} C_i^{(iv)} + O(\Delta x^4) \quad (1.47)$$

onde:

$$C_i'' = \frac{-C_{i+2} + 16C_{i+1} - 30C_i + 16C_{i-1} - C_{i-2}}{12(\Delta x)^2} \quad (1.48)$$

$$C_i^{(iv)} = \frac{C_{i+2} - 4C_{i+1} + 6C_i - 4C_{i-1} + C_{i-2}}{\Delta x^4} \quad (1.49)$$

obtem-se:

$$\frac{C'_d - C'_e}{\Delta x} = \frac{-C_{i+2} + 2C_{i+1} - 54C_i + 28C_{i-1} - C_{i-2}}{24\Delta x^4} + O(\Delta x^4) \quad (1.50)$$

O gradiente de quarta ordem da face direita pode ser representado por:

$$[C'_d]_{4ord} = \frac{C_{i+1} - C_i}{\Delta x} - \frac{C_{i+2} - 3C_{i+1} + 3C_i - C_{i-1}}{24\Delta x} \quad (1.51)$$

que foi obtido pela interpolação de um polinômio cúbico a partir dos pontos nodais: C_{i-1} , C_i , C_{i+1} e C_{i+2} .

Quando refina-se uma malha em MVF espera-se que a solução da equação diferencial seja estável e convergente. Para que isso ocorra é necessário satisfazer a condição CFL, esta estabelece que um método deve ser usado quando a informação se propaga a uma velocidade fisicamente correta.

1.7 Colocação do problema

No nosso país assim como no mundo existe o grande setor da agroindústria que fabrica óleo vegetal de grãos, e entre os métodos para a sua fabricação, o mais usado é a extração por solvente, sendo o mais convencional o hexano.

A extração do óleo inclui o movimento, em meio poroso e o enriquecimento do hexano, a difusão do óleo, a penetração do hexano nos poros da matéria-prima e a difusão do óleo à fase “bulk”, a passagem do óleo da fase sólida da matéria-prima para os poros, etc.

O modelo de leito fixo (MAJUMDAR,et al,1995; MOREIRA,1998) foi uma das aplicações diretamente orientada na extração do óleo vegetal, utilizando modelagem matemática para compreender o processo de extração utilizando solvente.

As empresas mostram-se interessadas na possibilidade de escolha de regimes ótimos de funcionamento, de otimização da estrutura da matéria-prima, a fim de proporcionar a diminuição de custos de produção e aumento da produtividade. Para contribuir com isto pode-se contar com a modelagem matemática.

A colocação do problema pode ser apresentada da seguinte maneira:

- 1) Pesquisar a técnica do método de volumes finitos.
- 2) Aplicar esta técnica a problema de extração de óleo vegetal.
- 3) Estudar o modelo matemático aplicado ao equipamento laboratorial de leito fixo, verificando os componentes do mesmo e sua função no processo de extração.
- 4) Ajustar o modelo matemático para leito fixo encontrado na bibliografia (MAJUMDAR,et al,1995; MOREIRA,1998) e equipamento laboratorial de acordo com as necessidades impostas pelos experimentos visando resultados em condições semelhantes às da indústria.
- 5) Desenvolver aplicativo para solução do modelo com características do equipamento laboratorial, usando o método de volumes finitos.
- 6) Realizar simulações numéricas e comparações dos resultados com equipamento real industrial.

2. Modelo Matemático

Neste capítulo é demonstrado o esquema físico da extração em leito fixo (2.1), o modelo matemático do leito fixo (2.2) e o modelo escrito na forma de volumes finitos (2.3).

2.1. Esquema físico da extração em um leito fixo

Considera-se leito fixo o equipamento formado por uma coluna vertical que recebe no seu topo o solvente percolando entre as partículas sólidas de matéria-prima contidas no interior desta coluna, sendo que estas partículas permanecem imóveis durante o processo de extração. Durante a percolação ocorre a passagem do óleo, contido nas partículas, para o solvente formando assim a micela.

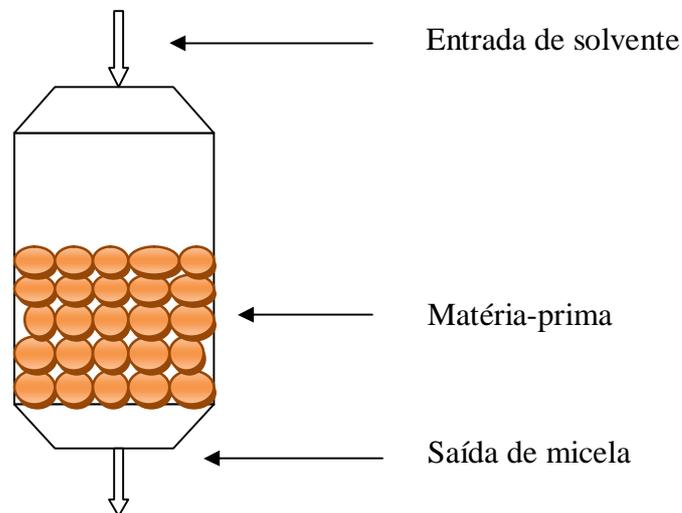


Figura 2.1 - Esquema do leito fixo.

Tem-se (MAJUMDAR, et al, 1995; MOREIRA, 1998; THOMAS, 2003; VELOSO, 1999) que os meios porosos da matéria-prima se dão conforme o esquema seguinte:

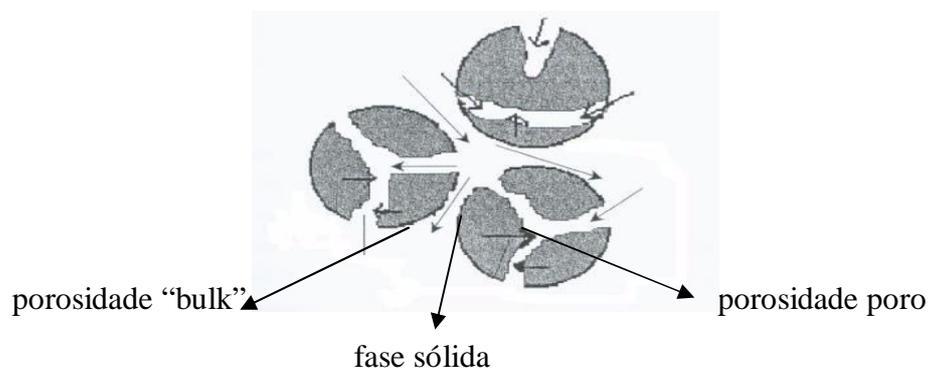


Figura 2.2 - Esquema representativo das porosidades da matéria-prima.

As partículas de matéria-prima possuem duas fases, sendo a primeira denominada porosidade poro e representado por ε_p e a segunda denominada fase sólida representado por N , sendo que ambas contem certa quantidade de óleo. Existem espaços entre as partículas denominados de porosidade “bulk” e representados por ε_b , por estes espaços ocorre a percolação do solvente e posteriormente da micela.

Durante esta percolação ocorre por difusão a transferência de óleo da fase sólida para a fase poro e conseqüentemente da fase poro para a fase “bulk”, enriquecendo assim o solvente denominado micela (solvente com óleo). A medida que estas transferências ocorrem há uma busca contínua de equilíbrio entre as concentrações das três fases.

Durante a extração a micela que sai do leito através do fundo perfurado é recirculada até que ocorra um equilíbrio estacionário entre as fases, neste momento é concluído a extração.

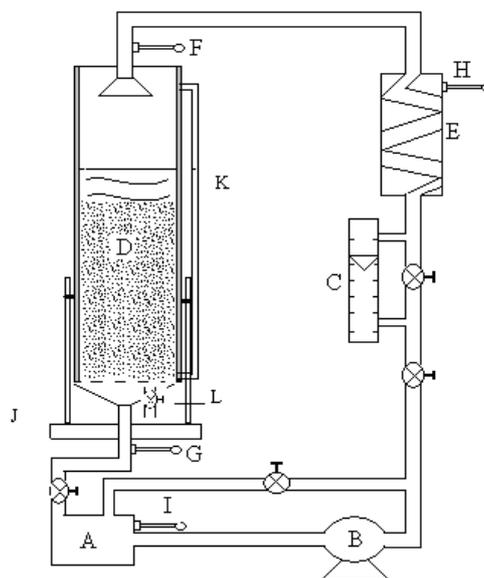


Figura 2.3 - Esquema físico do extrator laboratorial de leito fixo.

onde: D-câmara de extração; J-balança eletrônica; B-bomba centrífuga; A-reservatório; L-válvula; C-fluxômetro; E-serpentina; F,G,H,I-termômetros; K-medidor de nível do leito.

A câmara de extração é um cilindro de metal vertical de 0,14m de diâmetro interno e 0,6m de altura e no seu interior há um cesto de tela que retém a matéria-prima deixando passar a micela. Estão montados sobre uma balança eletrônica que registra a massa a qualquer momento do processo. A micela, após percolar a matéria-prima, é depositada num reservatório, porém é recirculada por uma bomba centrífuga passando pelo fluxômetro e pela serpentina submersa em água com temperatura constante de 50⁰C mantida por uma caldeira. A temperatura é controlada por quatro termômetros. Esse processo dura aproximadamente 70 min. A cada intervalo de tempo estipulado é coletada amostras de micela através da válvula. Também o fluxômetro com auxílio de um medidor de nível de leito controla a taxa de fluxo de micela que deve ser mantido constante, com peso constante do líquido na coluna de extração.

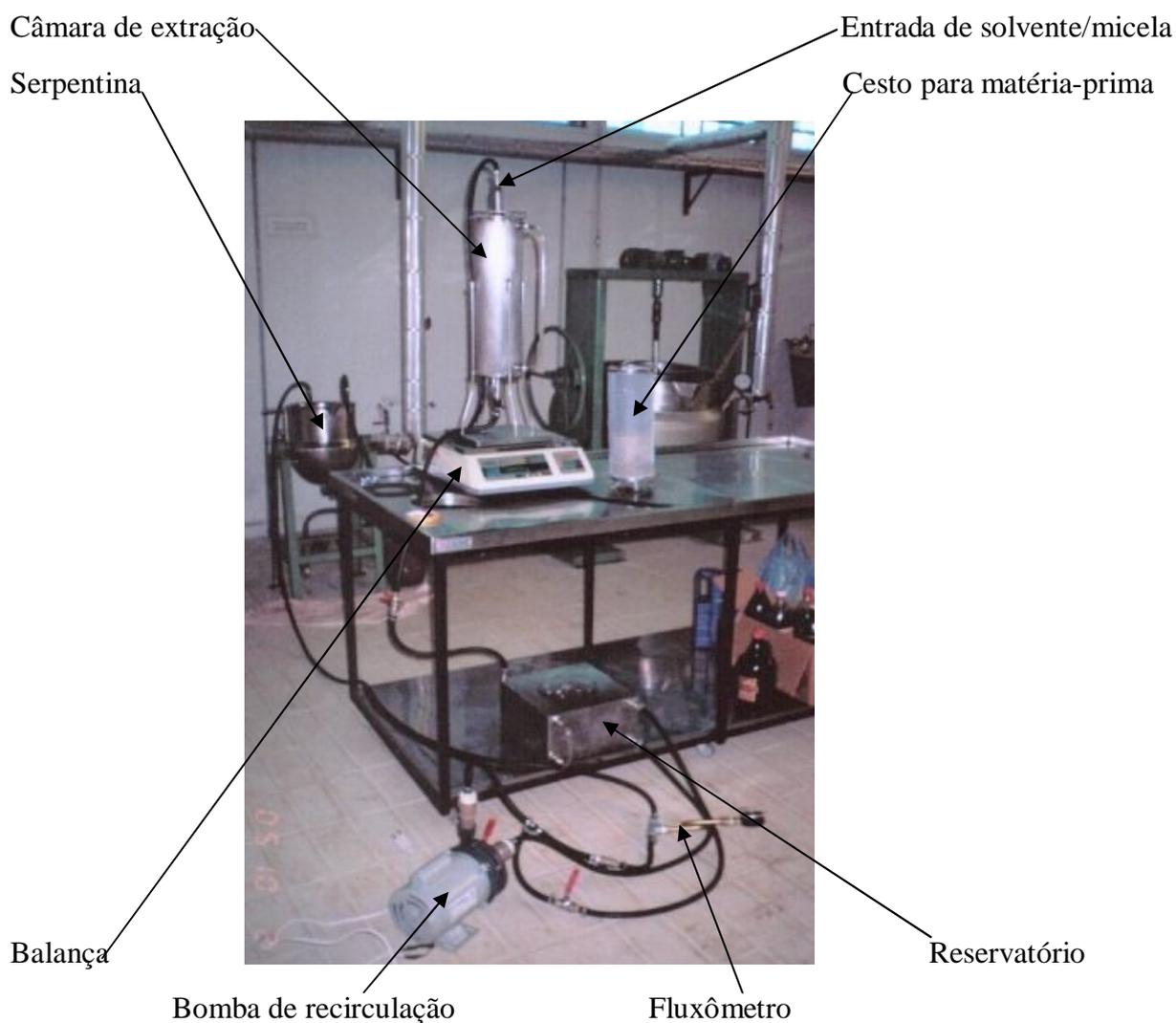


Figura 2.4 - Extrator laboratorial de leito fixo.

O modelo de leito fixo possui algumas peculiaridades, descritas nos fenômenos a seguir:

- transferência de óleo da fase sólida para a fase poro;
- percolação da micela pela matéria-prima;
- transferência do óleo da fase poro para fase “bulk”;
- ocorre difusão ao longo da coluna do leito fixo, na direção vertical;
- continuamente há refluxo da micela até o momento do equilíbrio estacionário.

Também foram considerados algumas hipóteses simplificadoras no modelo matemático:

- a concentração de óleo é uniforme na fase poro;
- na fase “bulk” não há gradientes de concentrações radiais;
- considera-se constantes e uniformes as porosidades das partículas e do leito, assim como a temperatura;

- não ocorre geração de calor na mistura durante o processo de extração;
- considera-se totalmente rompidas as paredes celulares da matéria-prima.

A observação sobre as porosidades é de suma importância visto que elas influenciam diretamente no processo de extração. Pode-se então determinar alguns casos relacionados à porosidade:

Porosidade “bulk” grande:

- a percolação é facilitada e a extração é mais rápida;
- a concentração na saída do extrator é menor;
- há um aumento na vazão de micela;
- consumo maior para o bombeamento.

Porosidade poro grande:

- ocorre retenção maior de micela ao final do processo;
- maiores gastos com a desolventização;
- há maior concentração de óleo na micela.

Outro aspecto a ser considerado na extração é a área específica de contato (a_p) entre as fases poro e “bulk”. Quanto menor for a partícula de matéria-prima utilizada no processo de extrações, maior será a área específica de contato (a_p), ocorrendo desta forma uma maior difusão entre as fases, visto que a micela alcança com maior eficiência as cavidades internas.

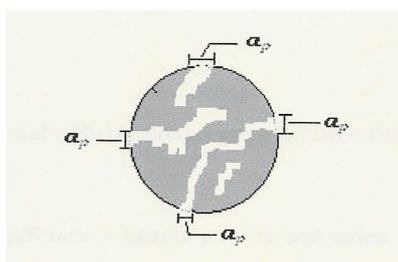


Figura 2.5 - Representação da área específica de contato (a_p) entre as fases poro e “bulk”.

Conforme estudos realizados por BLEY, 2007, a área específica de contato foi determinada como sendo $a_p = 23 \text{ m}^{-1}$.

2.2 Modelo matemático do Leito Fixo

O modelo matemático tem por base equações já desenvolvidas para a extração de óleo em leito fixo: MAJUMDAR, et al. (1995), MOREIRA (1998) e BLEY (2007).

Neste trabalho, busca-se o estudo destas equações através do método de volumes finitos.

O esquema do leito fixo (fig.2.3) é a base para a obtenção das equações, considerando que há balanços de massa para a micela e óleo no elemento de volume de altura Δz .

Equação da continuidade da fase micela “bulk”

No volume de controle em estudo considera-se fluxos de micela entrando e saindo, onde tem-se:

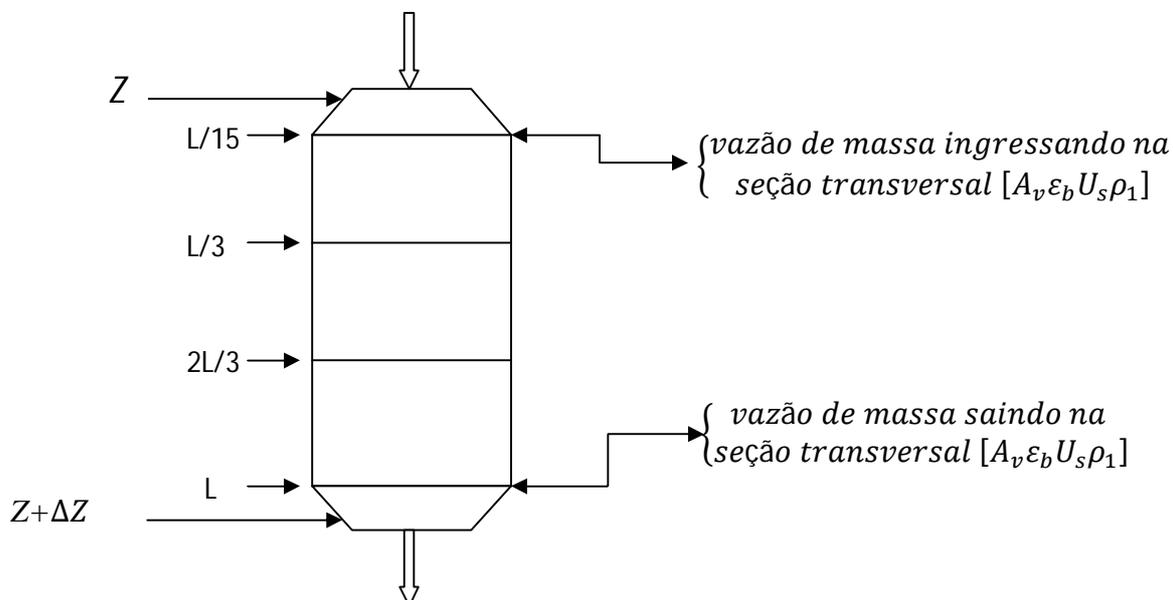


Figura 2.6 Esquema representativo do leito fixo

Considera-se ΔZ como sendo $\Delta Z \cdot A$, onde A é a área da seção transversal do extrator experimental de leito fixo.

Nestas condições, obtém-se a vazão mássica de contribuição da transferência de óleo da fase “bulk”:

$$k_f A_v \Delta_z (1 - \varepsilon_b) a_p \rho_1 (C_p - C) \quad (2.1)$$

Levando em consideração os fluxos no elemento volume de controle, tem-se um balanço de massa, onde:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{vazão de micela entrando em } z \\ + \\ \text{contribuição por difusão da fase poro para a fase "bulk"} \end{array} \right. = \text{vazão de micela em } Z + \Delta_z$$

Considerando Δ_z tendendo a zero e organizando a equação, tem-se:

$$\frac{\partial U_s}{\Delta z} = \frac{1 - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} k_f a_p (C_p - C) \quad (2.2)$$

Aplica-se algumas condições de contorno:

$$Z = 0 \quad U_s = U_0 \quad , \text{ quando } t = 0 \dots t_f$$

- Grandezas adimensionais:

$$U = \frac{U_s}{U_0} \quad z = x.L \quad \tau = \frac{U_0.t}{L} \quad (2.3)$$

Substituindo as grandezas adimensionais na equação (2.1), resulta em:

$$\frac{\partial U}{\partial C} = \frac{L}{U_0} a_p k_f (C_p - C) \left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right) \quad (2.4)$$

- Grupos adimensionais:

$$* \text{ Sherwood} \quad Sh = \frac{K_f d_p}{D_{AB}} \quad (2.5)$$

$$* \text{ Peclet} \quad Pe = \frac{U_0 d_p}{D_{AB}} \quad (2.6)$$

$$\text{Fazendo Sherwood igual a Peclet, obtém-se: } \frac{K_f}{U_0} = \frac{Sh}{Pe} \quad (2.7)$$

A partir destas definições usadas na equação (2.3), obtém-se a equação final:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b} (a_p L) \frac{Sh}{Pe} (a_p k_f) (C_p - C) \quad (2.8)$$

Equação da continuidade das espécies na fase “bulk”

A variação da concentração de óleo na micela durante determinado tempo no elemento de volume em estudo é expresso pela continuidade de óleo na fase “bulk”, representado pela equação:

$$\varepsilon_b \Delta z \frac{\partial C_i}{\partial t} = (U_i C_{i-1} - U_{i+1} C_i) \varepsilon_b + D_{AB} \varepsilon_b \left(\frac{C_{i+1} - C_i}{\Delta z} \right) + D_{AB} \varepsilon_b \left(\frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta z} \right) + (1 - \varepsilon_b) \Delta z k_f a_p (C_{pi} - C_i) \quad (2.9)$$

Onde tem-se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial UC}{\partial z} + D_{AB} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right) k_f a_p (C_p - C) \quad (2.10)$$

Aplicando novamente a troca de variáveis e reorganizando, obtém-se:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = - \frac{\partial UC}{\partial x} + \frac{D_{AB}}{U_0 L} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right) \frac{k_f}{U_0} a_p L (C_p - C) \quad (2.11)$$

Levando em consideração que:

$$\frac{D_{AB}}{U_0 L} = \frac{d_p}{P_e L} \quad \text{e} \quad \frac{k_f}{U_0} = \frac{Sh}{P_e}$$

Então:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -\frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{1}{P_e} \frac{d_p}{L} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right) a_p L \frac{Sh}{P_e} (C_p - C) \quad (2.12)$$

Equação da continuidade da espécie “óleo” na fase poro:

Durante a extração ocorre uma busca constante de equilíbrio entre as fases poro, sólida e “bulk”. Durante a transferência de óleo entre a fase poro e “bulk” busca-se um equilíbrio, sendo que o mesmo ocorre entre as fases sólida e poro. Considerando estes fenômenos, tem-se a equação inicial:

$$\varepsilon_p \frac{\partial C_p}{\partial t} = -(1 - \varepsilon_p) \frac{\partial N}{\partial t} - k_f a_p (C_p - C) \quad (2.13)$$

Sendo:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial N}{\partial C_p} \frac{\partial C_p}{\partial t} \quad (2.14)$$

Substituindo e fatorando, obtem-se:

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} \left[\varepsilon_b + (1 - \varepsilon_p) \frac{\partial N}{\partial C_p} \right] + k_f a_p (C_p - C) = 0 \quad (2.15)$$

Realizando novamente as substituições de variáveis e reorganizando, tem-se:

$$\frac{\partial C_p}{\partial \tau} \left[\varepsilon_b + (1 - \varepsilon_p) \frac{\partial N}{\partial C_p} \right] + \frac{k_f}{U_0} (a_p L) (C_p - C) = 0 \quad (2.16)$$

Efetuada uma divisão por ε_b e usando os grupos adimensionais na equação, tem-se:

$$\frac{\partial C_p}{\partial \tau} \left[1 + \left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b}\right) \frac{\partial N}{\partial C_p} \right] + \frac{1}{\varepsilon_b} \frac{Sh}{P_e} (a_p L) (C_p - C) = 0 \quad (2.17)$$

- Número de Sherwood:

$$Sh = 2,4R_e^{0,34} Sc^{0,42} \quad \text{para } 0,08 < R_e < 0,125 \quad (2.18)$$

$$Sh = 0,44R_e^{0,69} Sc^{0,42} \quad \text{para } 0,125 < R_e < 5000 \quad (2.19)$$

2.3 Método Numérico Volumes Finitos

As equações que compõe o modelo matemático são complexas para serem resolvidas de forma analítica. Neste trabalho elas são resolvidas numericamente através do Método de Volumes Finitos.

No método de volumes finitos, o procedimento de discretização das equações tem início com a integração das equações diferenciais governantes, considerando a velocidade constante, onde tem-se:

- Equação que representa a variação de óleo da fase “bulk”.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V_m \frac{\partial C}{\partial x} + D_{AB} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right) K_f a_p (C_p - C) \quad (2.20)$$

e

- Equação que representa a variação de óleo da fase poro.

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} = - \frac{K_f a_p}{\varepsilon_p + (1-\varepsilon_p)E_d} (C_p - C) \quad (2.21)$$

2.3.1 O Método de Volumes Finitos

É importante que a modelagem matemática atenda a princípios de conservação localmente e por todo o domínio.

A característica mais atrativa do método de volumes finitos é a de que a solução obtida deve verificar a integral de conservação de uma determinada quantidade física expressa pelas equações governantes sobre qualquer volume finito, também denominado volume de controle e, obviamente, sobre todo o domínio de resolução.

A equação diferencial (2.20), obtida do princípio de conservação, que governa a variação de concentração de óleo da fase “bulk”, que pode ser escrita na forma:

$$\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{termo transiente}} = - \underbrace{\vec{V} \frac{\partial C}{\partial x}}_{\text{termo advectivo}} + \underbrace{\Gamma \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}}_{\text{termo difusivo}} + \underbrace{S_C}_{\text{termo fonte}} \quad (2.22)$$

onde:

$$\Gamma = D_{AB}$$

$$S_c = \left(\frac{1-\varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right) K_f a_p (C_p - C)$$

Nesta equação C é a variável dependente (que representa a concentração de óleo na fase “bulk”), V é o fluxo advectivo, Γ é o coeficiente de difusão para o transporte de C , S_c é o termo fonte, que engloba todos os termos que não podem ser acomodados nos termos advectivo e difusivo, e t é o tempo.

O domínio de resolução é constituído de vários volumes de controle. Os valores das variáveis dependentes C são determinados nos nós que encontram-se no centro de cada volume de controle, enquanto que as componentes do fluxo V_m são determinadas nas faces do volume de controle. Os volumes de controle que se encontram nos limites do domínio têm as suas faces coincidentes com a fronteira e possuem, portanto, um vetor nulo. Na figura 2.6 é representado de forma esquemática o volume de controle. Nesta figura as letras maiúsculas (P, W, E, S, N) indicam os nós e as minúsculas as faces do volume de controle (w,e,s,n). (Schulz, et al., 2006).

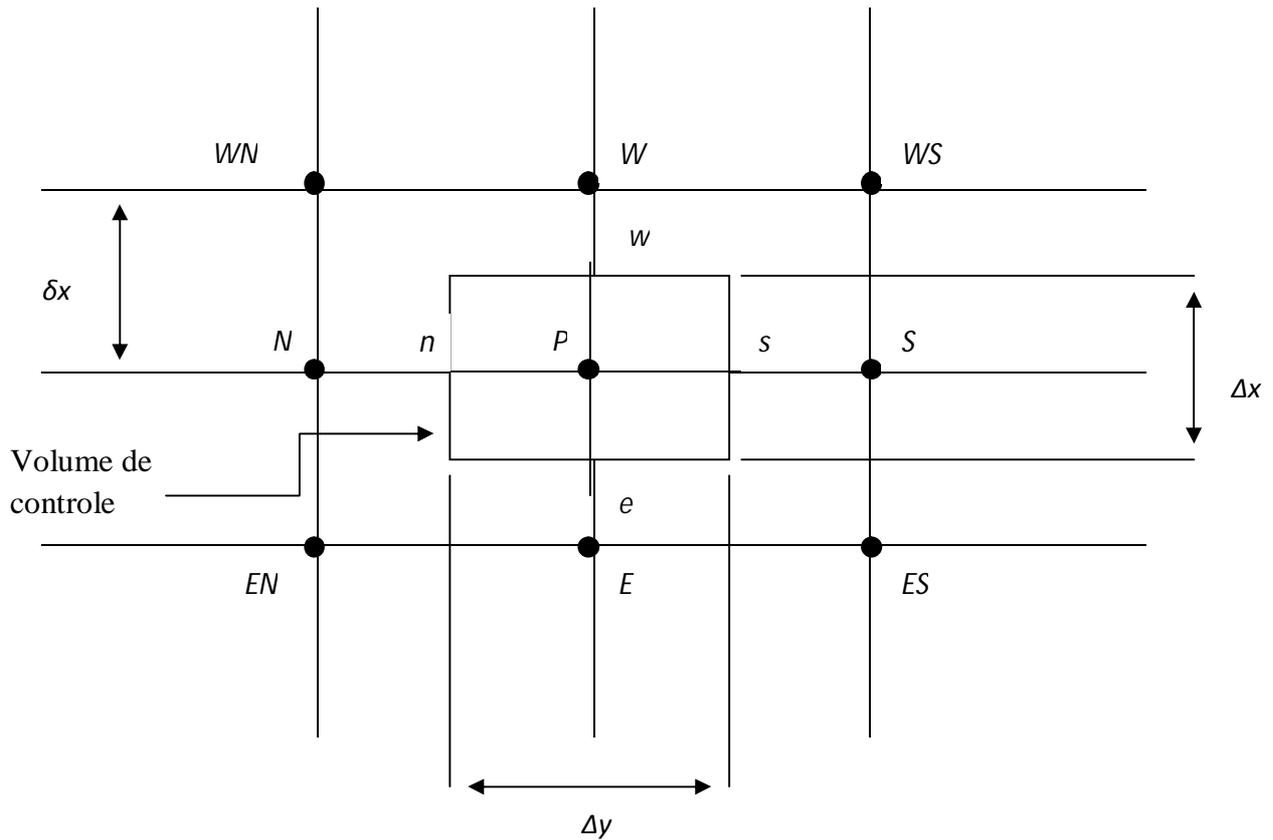


Figura 2.7 Esquema do volume finito.



Integrando, a equação (2.22) sobre um volume de controle, tem-se:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial C}{\partial t} dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} (-\vec{V}) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} S_C dV dt \quad (2.23)$$

De acordo com a escolha de γ e β , pode-se recuperar diferentes esquemas de discretização no tempo: totalmente explícito ($\gamma = 0$ e $\beta = 0$); Crank-Nicolson ($\gamma = 0$ e $\beta = 0,5$); totalmente implícito ($\gamma = 0$ e $\beta = 1$) e totalmente explícito a três níveis de tempo ($\gamma \neq 0$ e $\beta = 0$). (Schulz, et al., 2006).

$$\int_{CV} \left[(1 + \gamma) \frac{[(C_P)^{m+1} - (C_P)^m]}{\Delta t} - \gamma \frac{(C_P)^m - (C_P)^{m-1}}{\Delta t} \right] dv = (1 - \beta) \left\{ \int_{CV} [\nabla \cdot (-\vec{V} C + \Gamma \nabla C) + S_C] dV \right\}^m + \beta \left\{ \int_{CV} [\nabla \cdot (-\vec{V} C + \Gamma \nabla C) + S_C] dV \right\}^{m-1} \quad (2.24)$$

onde:

$$\vec{V} = u\vec{i}$$

obtem-se:

$$(1 + \gamma) \left[\frac{C_P|^{m+1}}{\Delta t} \right] \Delta y - \gamma \left[\frac{C_P|^{m-1}}{\Delta t} \right] \Delta y = (1 - \beta) \left[\left(uC - \Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right)_w - \left(uC - \Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right)_e \right]^m \Delta y + \beta \left[\left(uC - \Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right)_w - \left(uC - \Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right)_e \right]^{m-1} \Delta y + (1 - \beta) \bar{S}^m \Delta x + \beta \bar{S}^{m-1} \Delta y \quad (2.25)$$

No desenvolvimento que será feito a seguir, tendo por base a equação discretizada (2.25), será considerado o caso do esquema de discretização no tempo explícito a três níveis de tempo, onde $\gamma \neq 0$ e $\beta = 0$:

$$(1 + \gamma) \left[\frac{C_P|^{m+1}}{\Delta t} \right] \Delta y - \gamma \left[\frac{C_P|^{m-1}}{\Delta t} \right] \Delta y = \left[u_w C_w - \left(\Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right)_w - \mu_e C_e + \left(\Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right)_e \right]^m \Delta y + \bar{S}^m \Delta y \quad (2.26)$$

2.3.1.1 Diferenças Centradas

Será realizada uma aproximação por diferenças centradas na discretização dos termos difusivos (Γ). O esquema de diferenças centradas, usa uma interpolação linear. Considerando que as faces do volume de controle estejam localizadas no meio da distância entre os nós, tem-se:

$$C_e = \frac{C_E + C_P}{2}$$

$$C_w = \frac{C_W + C_P}{2}$$

e portanto:

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_e = \frac{C_E - C_P}{\delta_x}$$

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_w = \frac{C_P - C_W}{\delta_x}$$

Estas equações representam o esquema de diferenças centradas para os termos difusivos (Γ – coeficiente de difusão para o transporte de C).

Considerando as aproximações propostas para a representação do fluxo difusivo, obtém-se a seguinte forma discretizada:

$$(1 + \gamma) \left[\frac{C_P^{m+1}}{\Delta t} \right] \Delta y - \gamma \left[\frac{C_P^m}{\Delta t} \right] \Delta y = \left[u_w C_w - \Gamma_w \frac{C_P - C_w}{\delta x_w} \right]^m \Delta y - \left[u_e C_e - \Gamma_e \frac{C_E - C_P}{\delta x_e} \right]^m \Delta y + \bar{S}^m \Delta y \quad (2.27)$$

Esta equação pode ainda ser reescrita como:

$$\begin{aligned} (1 + \gamma) a_P^m C_P^{m+1} - (1 + 2\gamma) a_P^m C_P^m + \gamma a_P^m C_P^{m-1} \\ = (F_w C_w^m - D_w C_P^m + D_w C_w^m - F_e C_e^m + D_e C_E^m - D_e C_P^m) \\ + (S_C + S_P C_P^m) \Delta y \end{aligned} \quad (2.28)$$

Onde introduzindo as seguintes variáveis:

$$a_P^m = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

$$F_w = u_w^m \Delta y ; F_e = u_e^m \Delta y ;$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w^m \Delta y}{\delta x_w} ; D_e = \frac{\Gamma_e^m \Delta y}{\delta x_e} ;$$

e o termo fonte foi linearizado na forma:

$$\bar{S}^m = S_C + S_P C_P^m$$

Embora a aproximação por diferenças centradas seja empregada com sucesso na discretização dos termos difusivos (Γ), esta aproximação pode apresentar soluções oscilatórias para valores do número de Reynolds (ou Peclet) de célula superior a 2.

2.3.1.2 Esquema Upwind

A fim de evitar o aparecimento de coeficientes negativos e as oscilações numéricas, usa-se o esquema upwind.

O esquema upwind leva em conta a direção do fluxo. Quando o fluxo é na direção positiva, as funções de interpolação tem as seguintes expressões:

$$C_w = C_W$$

$$C_e = C_P \quad F > 0$$

e a equação (2.28) discretizada, torna-se:

$$\begin{aligned} (1 + \gamma)a_P^m C_P^{m+1} - (1 + 2\gamma)a_P^m C_P^m + \gamma a_P^m C_P^{m-1} \\ = (F_w C_W^m - D_w C_P^m + D_w C_W^m - F_e C_P^m + D_e C_E^m - D_e C_P^m) \\ + (S_C + S_P C_P^m) \Delta y \end{aligned} \quad (2.29)$$

reagrupando, os diferentes termos, tem-se:

$$\begin{aligned} [-(1 + 2\gamma)a_P^m + (D_w + F_w) + D_e + (F_e - F_w) - S_P \Delta y] C_P^m \\ = [D_w + F_w] C_W^m + [D_e] C_E^m + S_C \Delta y - (1 + \gamma)a_P^m C_P^{m+1} \\ - \gamma a_P^m C_P^{m-1} \end{aligned} \quad (2.30)$$

A expressão acima pode ser escrita na forma:

$$a_P C_P^m = a_W C_W^m + a_E C_E^m + b \quad (2.31)$$

onde:

$$a_W = D_w + F_w$$

$$a_E = D_e$$

$$\begin{aligned}
a_P &= a_W + a_E + (F_e - F_w) - (1 + 2\gamma)a_P^m - S_P\Delta y \\
b &= S_C\Delta y - (1 + \gamma)a_P^m C_P^{m+1} - \gamma a_P^m C_P^{m-1}
\end{aligned}
\tag{2.32}$$

As equações anteriores foram obtidas considerando que os fluxos eram positivos. O mesmo procedimento pode ser empregado para os fluxos negativos:

$$C_W = C_P \quad F < 0$$

$$C_e = C_E$$

então:

$$\begin{aligned}
(1 + \gamma)a_P^m C_P^{m+1} - (1 + 2\gamma)a_P^m C_P^m + \gamma a_P^m C_P^{m-1} \\
= (F_w C_P^m - D_w C_P^m + D_w C_W^m - F_e C_E^m + D_e C_E^m - D_e C_P^m) \\
+ (S_C + S_P C_P^m)\Delta y
\end{aligned}
\tag{2.33}$$

reescrevendo, tem-se:

$$\begin{aligned}
[-(1 + 2\gamma)a_P^m + (D_w - F_w) + D_e - S_P\Delta y]C_P^m \\
= [D_w]C_W^m + [D_e - F_e]C_E^m + S_C\Delta y - (1 + \gamma)a_P^m C_P^{m+1} \\
- \gamma a_P^m C_P^{m-1}
\end{aligned}
\tag{2.34}$$

reagrupando os termos, obtem-se:

$$\begin{aligned}
[-(1 + 2\gamma)a_P^m + D_w + (D_e - F_e) + (F_e - F_w) - S_P\Delta y]C_P^m \\
= [D_w]C_W^m + [D_e - F_e]C_E^m + S_C\Delta y - (1 + \gamma)a_P^m C_P^{m+1} \\
- \gamma a_P^m C_P^{m-1}
\end{aligned}
\tag{2.35}$$

A equação anterior, também pode ser escrita numa forma compacta:

$$a_P C_P^m = a_W C_W^m + a_E C_E^m + b \tag{2.36}$$

onde:

$$a_W = D_W$$

$$a_E = D_e - F_e$$

$$a_p = a_W + a_E - (1 + 2\gamma)a_p^m - S_P\Delta y + (F_e - F_W) \quad (2.37)$$

$$b = S_C\Delta y - (1 + \gamma)a_p^m C_P^{m+1} - \gamma a_p^m C_P^{m-1} \quad (2.38)$$

A partir destes dois desenvolvimentos, será feito uma representação que se aplica ao caso do fluxo positivo quanto negativo:

$$a_p C_P^m = a_W C_W^m + a_E C_E^m + b \quad (2.39)$$

onde:

$$a_W = D_W + \llbracket F_W, 0 \rrbracket$$

$$a_E = D_e + \llbracket -F_e, 0 \rrbracket$$

$$a_p = a_W + a_E - (1 + 2\gamma)a_p^m - S_P\Delta y + (F_e - F_W) \quad (2.40)$$

$$b = a_W + a_E + S_C\Delta y - (1 + \gamma)a_p^m C_P^{m+1} - \gamma a_p^m C_P^{m-1} \quad (2.41)$$

$\llbracket a, b \rrbracket$ indica que tomamos o maior valor entre a e b .

O mesmo procedimento realizado para a equação (2.20), que representava a variação de concentração de óleo da fase “bulk”, será também aplicado à equação (2.21), que representa a variação de concentração de óleo da fase poro.

A equação diferencial (2.26) pode então ser escrita na seguinte forma:

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} = n(C_p - C) \quad (2.42)$$

onde:

$$n = -\frac{K_f a_p}{\varepsilon_p + (1 - \varepsilon_p) E_d} \quad (2.43)$$

Integrando, a equação (2.42) sobre um volume de controle:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial C_p}{\partial t} dV dt - \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} S_{CV} dV dt \quad (2.44)$$

obtem-se:

$$(1 + \gamma) \left[\frac{C_P|_m^{m+1}}{\Delta t} \right] \Delta y - \gamma \left[\frac{C_P|_{m-1}^m}{\Delta t} \right] \Delta y = (1 - \beta) \bar{S}^m \Delta y + \beta \bar{S}^{m-1} \Delta y \quad (2.45)$$

Considerando o esquema de discretização no tempo explícito a três níveis de tempo, onde $\gamma \neq 0$ e $\beta = 0$:

$$(1 + \gamma) \left[\frac{C_P|_m^{m+1}}{\Delta t} \right] \Delta y - \gamma \left[\frac{C_P|_{m-1}^m}{\Delta t} \right] \Delta y = \bar{S}^m \Delta y \quad (2.46)$$

Reescrevendo a equação (2.46), tem-se:

$$(1 + \gamma) a_P^m C_P^{m+1} - (1 + 2\gamma) a_P^m C_P^m + \gamma a_P^m C_P^{m-1} = (S_C + S_P C_P^m) \Delta y \quad (2.47)$$

onde é introduzido as variáveis:

$$a_P^m = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

e o termo fonte foi linearizado na forma:

$$\bar{S}^m = S_C + S_P C_P^m$$

reagrupando os termos, tem-se:

$$[-(1 + 2\gamma)a_P^m - S_P \Delta y] C_P^m = S_C \Delta y - (1 + \gamma)a_P^m C_P^{m+1} - \gamma a_P^m C_P^{m-1} \quad (2.48)$$

A equação anterior, pode ser escrita na forma:

$$a_P C_P^m = b \quad (2.49)$$

onde:

$$a_P = -(1 + 2\gamma)a_P^m - S_P \Delta y \quad (2.50)$$

$$b = S_C \Delta y - (1 + \gamma)a_P^m C_P^{m+1} - \gamma a_P^m C_P^{m-1} \quad (2.51)$$

3 – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

O software escolhido para realizar as simulações numéricas de extração de óleo vegetal de soja foi programa desenvolvido por S. V. PATANKAR, que tem a vantagem de ser bastante utilizado em pesquisas científicas, e é muito confiável. Ele utiliza volumes finitos [PATANKAR, 1980], visto que o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento da extração de óleo vegetal de soja com o uso do método de volumes finitos. O regime básico de funcionamento considerou os seguintes parâmetros:

$$a_p=34,28(1/m) \quad d_p=0,005(m) \quad C_{in}=0,001 \quad \varepsilon_b=0,4 \quad \varepsilon_p=0,3 \quad V_{in}=0,005(m/s)$$

$$E_d=0,2032 \quad t_f=300(s) \quad D_{AB}=0,00001(m^2/s) \quad \mu=0,032(Kg/(m.s))$$

$$\rho = 680(Kg/m^3) \quad C_p^0=0,135$$

Primeiramente foram realizadas simulações com os dados existentes na literatura (MOREIRA, 1998) que considerou o percentual inicial de óleo na semente de soja como sendo de 13,5% onde para obter os resultados das simulações usou no modelo matemático o método de linhas e o Runge-Kutta. Para realizar a comparação, os dados iniciais do regime básico foram considerados os mesmos (MOREIRA, 1998) porém para obter os resultados das simulações foi utilizado volumes finitos.

Na figura 3.1 pode-se observar a variação da concentração de óleo na micela (C – concentração “bulk”) em relação ao tempo, na entrada do extrator ($L/15$), em duas posições intermediários ($L/3$ e $2L/3$) e na saída do extrator (L).

A concentração de óleo no hexano, no início do processo, é praticamente “zero”, porém com o início da extração ocorre uma migração de óleo da fase poro para a fase “bulk”, devido a diferença das concentrações. Observa-se, na figura 3.1, com o decorrer do tempo, um aumento da concentração de óleo na fase “bulk” e uma diminuição de óleo na fase poro.

Obtém-se o máximo valor para C quando a diferença aproxima-se de “zero”; logo após ocorre um decréscimo de C devido ao decréscimo de óleo na fase poro. Pode-se verificar que quanto mais alta encontra-se a seção de extração mais rápido obtém-se a extração de óleo e conseqüentemente a última seção levará mais tempo para finalizar o processo de extração.

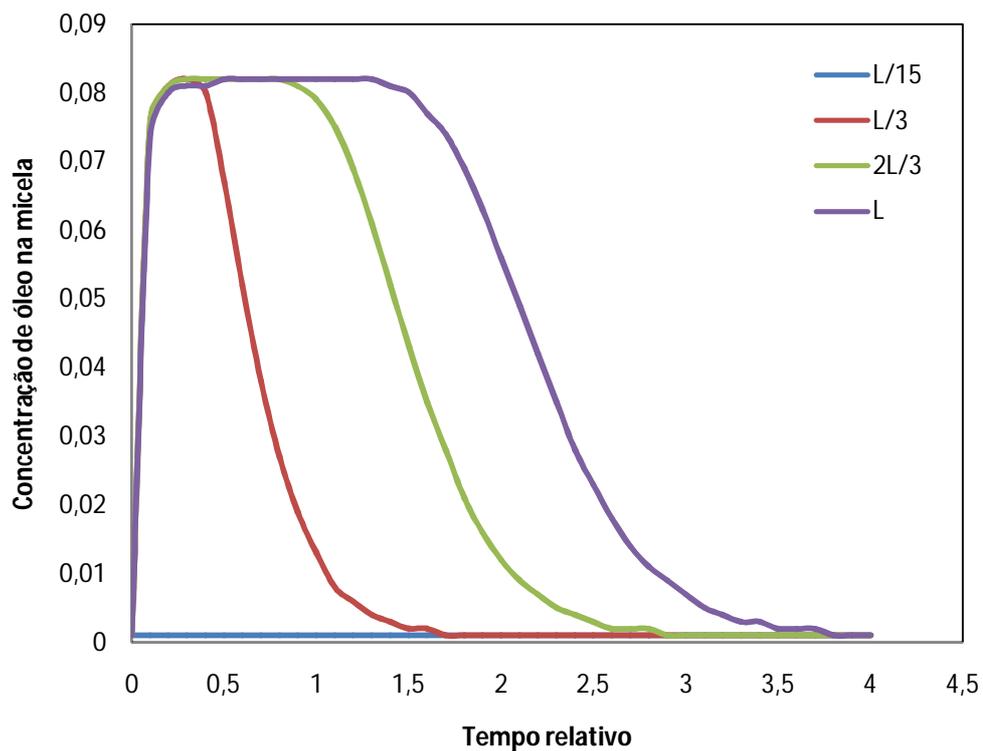


Figura 3.1 Variação da concentração do óleo (C) em micela em várias seções do leito.

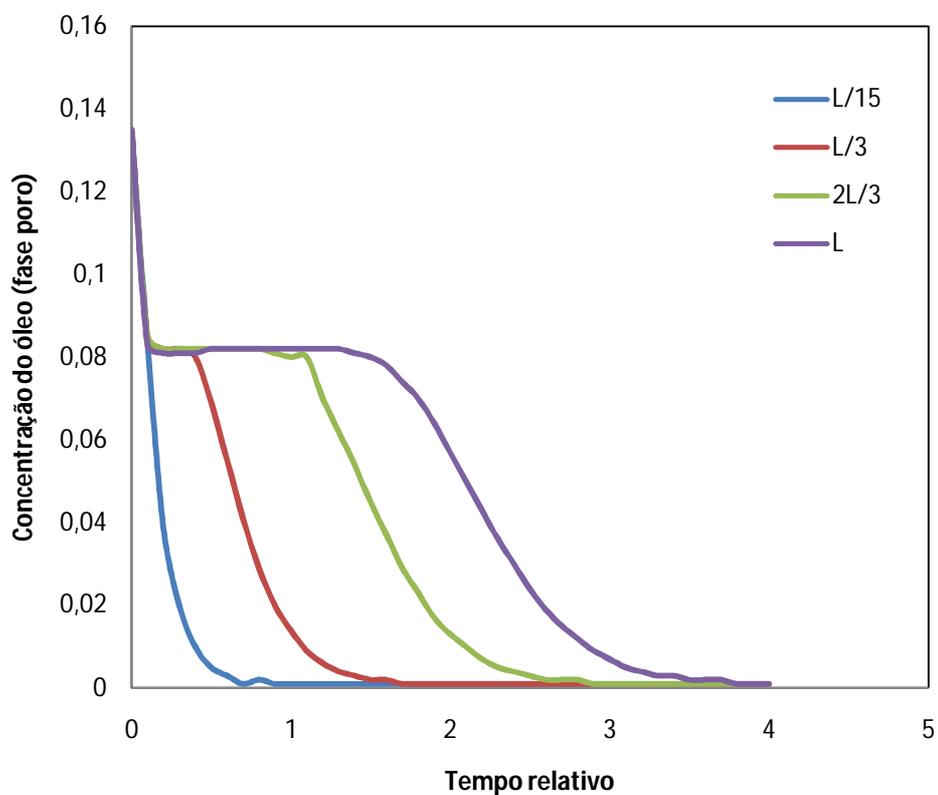


Figura 3.2 Variação da concentração do óleo (C_p) em várias seções do leito.

Na figura 3.2 tem-se o comportamento da variação da concentração de óleo na matéria-prima ou concentração poro (C_p), onde observa-se uma diminuição a medida que o óleo migra para a micela. Esse fenômeno ocorre rapidamente na etapa inicial, devido a diferença de concentrações entre a fase poro e a fase “bulk”, alcançando uma concentração máxima, onde, a partir deste momento, começa a decrescer devido ao esgotamento da fase porosa. Também esse processo é mais demorado na última camada do leito.

Pode-se observar que com o uso de volumes finitos obtém-se uma maior concentração de óleo na micela do que com o uso do método de linhas.

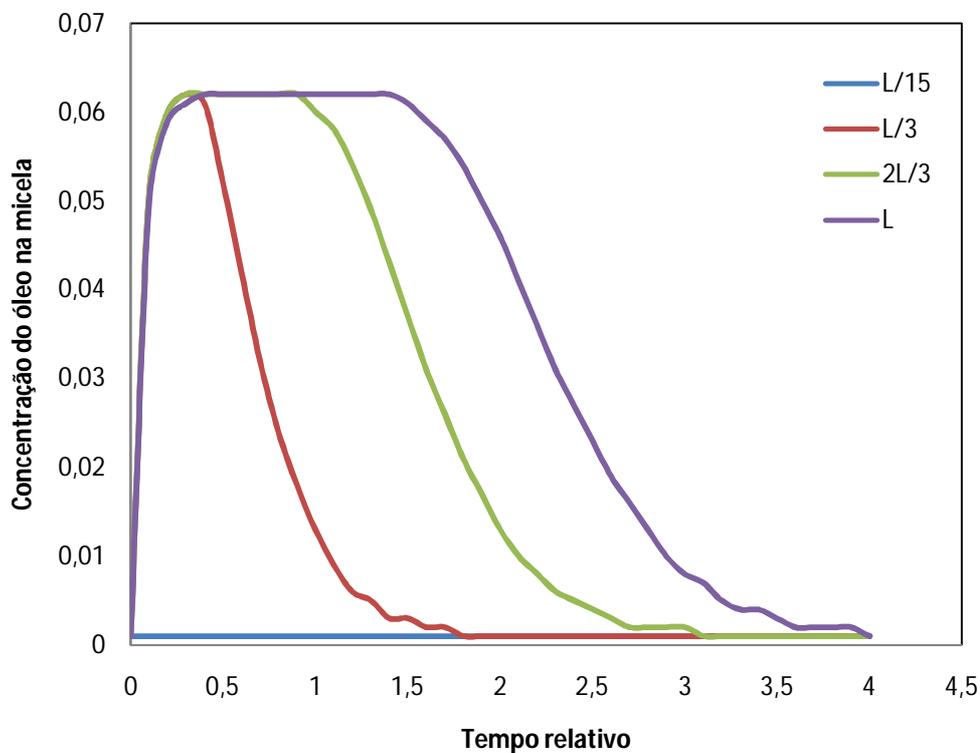


Figura 3.3 Variação da concentração do óleo (C) em micela para $\varepsilon_b=0,5$ e $\varepsilon_p=0,4$.

A porosidade poro e a porosidade “bulk” influenciam diretamente no processo de extração. Considera-se alguns aspectos: se a porosidade “bulk” for pequena, a percolação é dificultada, e haverá uma densidade maior de matéria-prima com uma presença maior de óleo por unidade de volume. Porém se a porosidade “bulk” for grande, a extração e a percolação

serão facilitadas, com menor concentração de óleo na micela, conseqüentemente haverá mais gastos com energia para extração de uma mesma quantidade de óleo.

De uma maneira semelhante a citada, a porosidade poro também influencia no processo de extração, onde sendo muito pequena dificulta um pouco a extração pois sua área de contato entre as fases também é pequena. Se for muito grande encarecerá o processo de extração, visto que haverá uma matéria-prima com baixa massa específica e conseqüentemente menor percentual de óleo.

Analisa-se, então, essa influência no processo, sem variar os demais dados iniciais do regime básico, usando um $\varepsilon_b=0,5$ e $\varepsilon_p=0,4$, conforme dados experimentais (FÁBIO, 2007), ou seja, maior que os anteriores. Pode-se observar, na figura 3.3, que sendo maior o ε_b , obtém-se uma menor concentração de óleo em micela e um aumento de tempo para finalizar a extração.

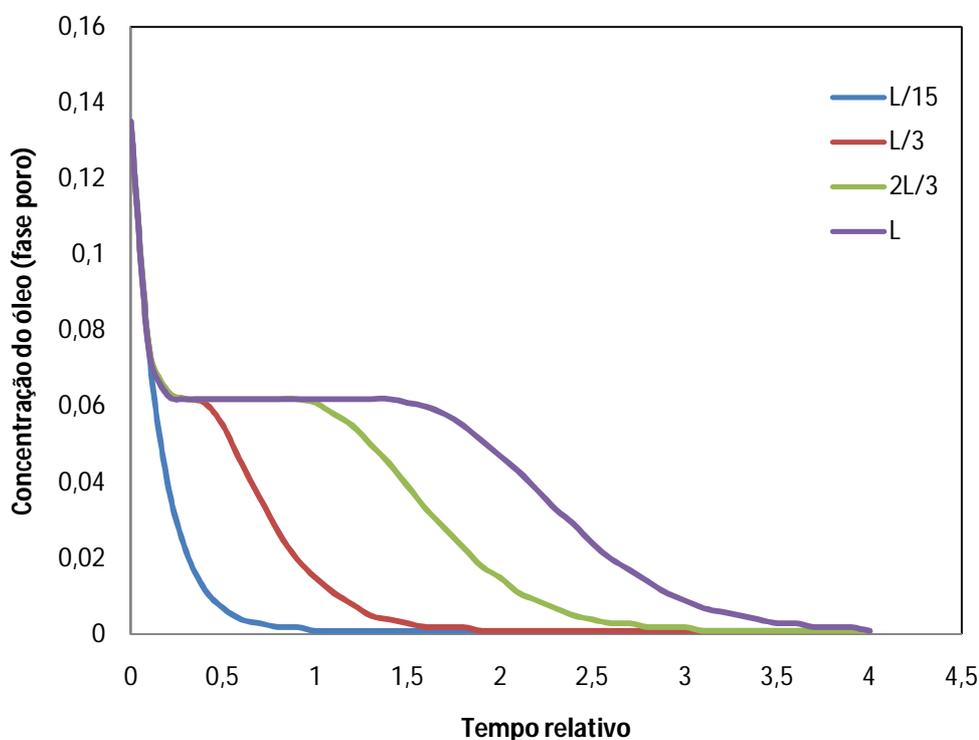


Figura 3.4 Variação da concentração de óleo (C_p) para $\varepsilon_b=0,5$ e $\varepsilon_p=0,4$.

Na figura 3.4, pode-se observar esta influência das porosidades na análise da concentração de óleo na fase poro, onde também houve um aumento considerável de tempo para extração com menor percentual de óleo.

Com base em dados da literatura (FABIO, 2007), tem-se um valor real para a concentração inicial de óleo na semente de soja, em torno de 18,5%. Então, as simulações seguintes levarão este dado em consideração, ficando como parâmetros do regime básico, os seguintes dados:

$$a_p=34,28(\text{l/m}) \quad d_p=0,005(\text{m}) \quad C_{in}=0,001 \quad \varepsilon_b=0,4 \quad \varepsilon_p=0,3 \quad V_{in}=0,005(\text{m/s})$$

$$E_d=0,2032 \quad t_f=300(\text{s}) \quad D_{AB}=0,00001(\text{m}^2/\text{s}) \quad \mu=0,032(\text{Kg}/(\text{m}\cdot\text{s}))$$

$$\rho = 680(\text{Kg}/\text{m}^3) \quad C_p^0=0,185$$

Então, usa-se novamente $\varepsilon_b=0,4$ e $\varepsilon_p=0,3$ e muda-se apenas a concentração inicial de óleo na matéria-prima para 18,5% para uma melhor análise entre o método de linhas e o de volumes finitos.

Considerando esta nova situação, as figuras 3.5 e 3.6 e fazendo-se uma comparação com as figuras 3.1 e 3.2, da concentração de óleo na micela e na fase poro em várias camadas do leito.

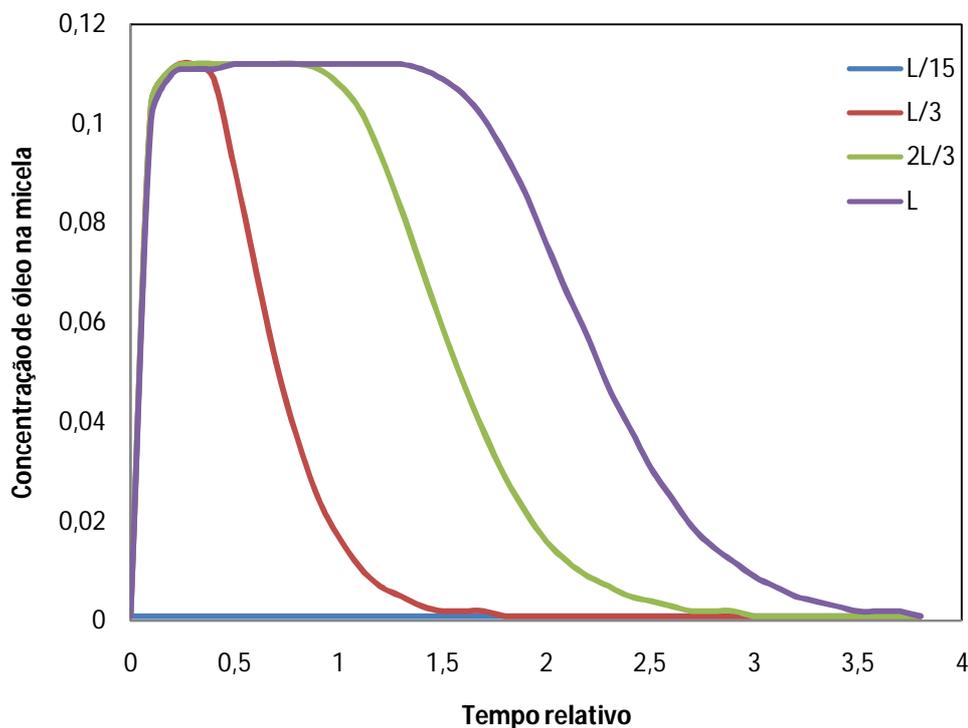


Figura 3.5 Variação da concentração do óleo (C) na micela em várias seções do leito, com o valor de $C_p^0=18,5\%$.

Pode-se verificar que com o aumento da concentração de óleo inicial na matéria-prima, ocorre também um aumento considerável na concentração de óleo na fase “bulk” com uma pequena redução no tempo de extração.

O mesmo comportamento observa-se na variação da concentração de óleo na matéria-prima, onde ocorre uma rápida migração de óleo da fase poro para a fase “bulk”, alcançando um patamar maior do que quando a concentração inicial de óleo na matéria-prima era de 13,5% conforme encontrado nos estudos de (MOREIRA, 1998) com o uso do método de linhas. Após isto, a fase porosa começa a se esgotar, diminuindo o seu nível até o completo esgotamento de óleo, onde verifica-se que este processo é mais lento na última camada do leito. Neste processo também houve uma pequena redução no tempo de extração.

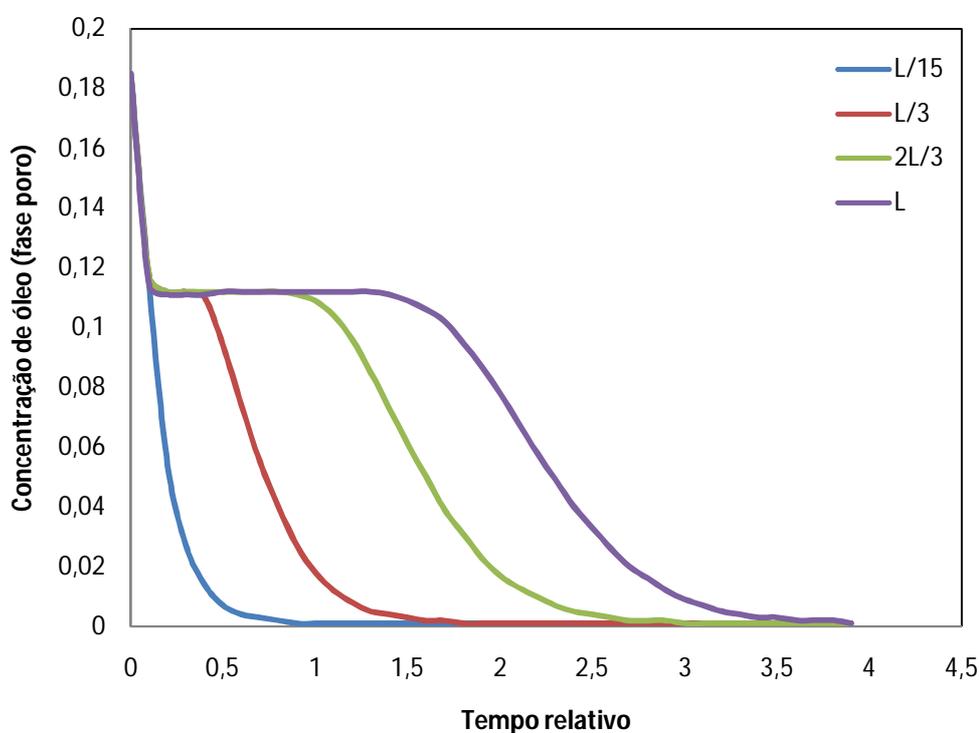


Figura 3.6 Variação da concentração do óleo (C_p) em várias seções do leito com percentual inicial de 18,5% de óleo na matéria-prima.

Parâmetros do regime básico:

$$a_p=34,28(\text{l/m}) \quad d_p=0,005(\text{m}) \quad C_{in}=0,001 \quad \varepsilon_b=0,5 \quad \varepsilon_p=0,4 \quad V_{in}=0,005(\text{m/s})$$

$$E_d=0,2032 \quad t_f=300(\text{s}) \quad D_{AB}=0,00001(\text{m}^2/\text{s}) \quad \mu=0,032(\text{Kg}/(\text{m.s}))$$

$$\rho = 680(\text{Kg}/\text{m}^3) \quad C_p^0=0,185$$

Como pode-se observar anteriormente, o valor da porosidade poro e porosidade “bulk” influenciam diretamente no processo de extração, então a análise seguinte tem por objetivo verificar as alterações ocorridas com a mudança de concentração inicial na matéria-prima para 18,5%, alterando ε_b e ε_p agora conforme dados reais experimentais (FÁBIO, 2007).

Na figura 3.7 nota-se que o percentual de óleo na micela diminuiu com o aumento de ε_p e ε_b , o que já era esperado, porém obteve-se um valor maior do que com $C_p^0=13,5\%$, utilizado por (MOREIRA, 1998). Com o aumento de óleo na fase porosa houve um aumento no tempo total de extração, visto que existia mais óleo para ser extraído. Na figura 3.8, onde há os valores para a variação da fase porosa, nota-se que também houve um tempo maior para o esgotamento total de óleo da matéria-prima.

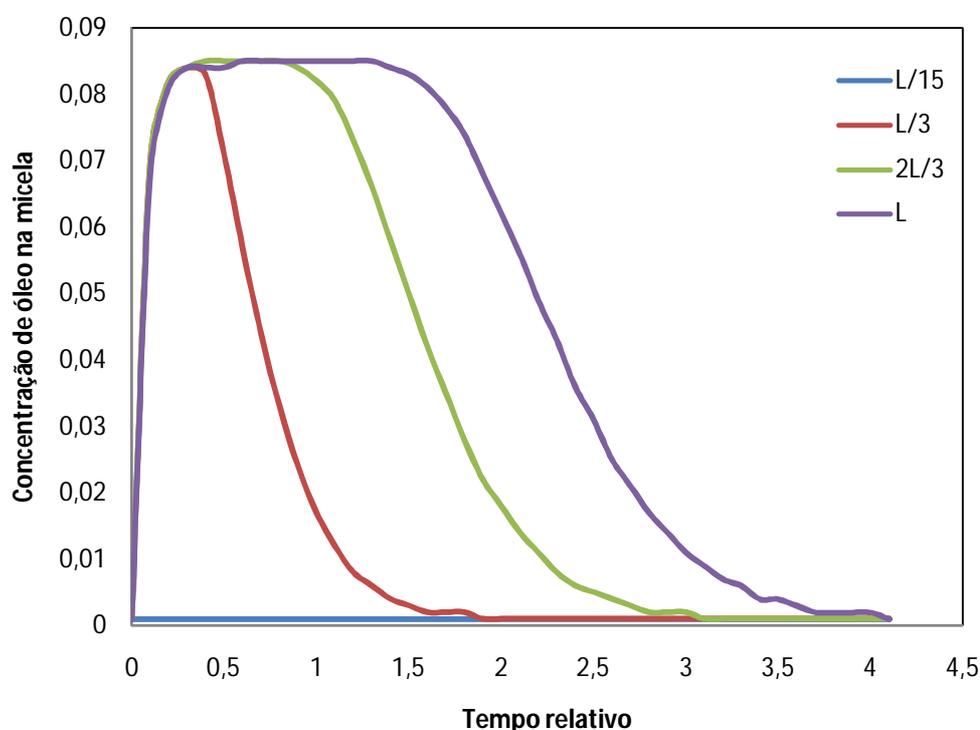


Figura 3.7 Variação da concentração do óleo (C) em micela para $\varepsilon_b=0,5$, $\varepsilon_p=0,4$ e $C_p^0=18,5\%$.

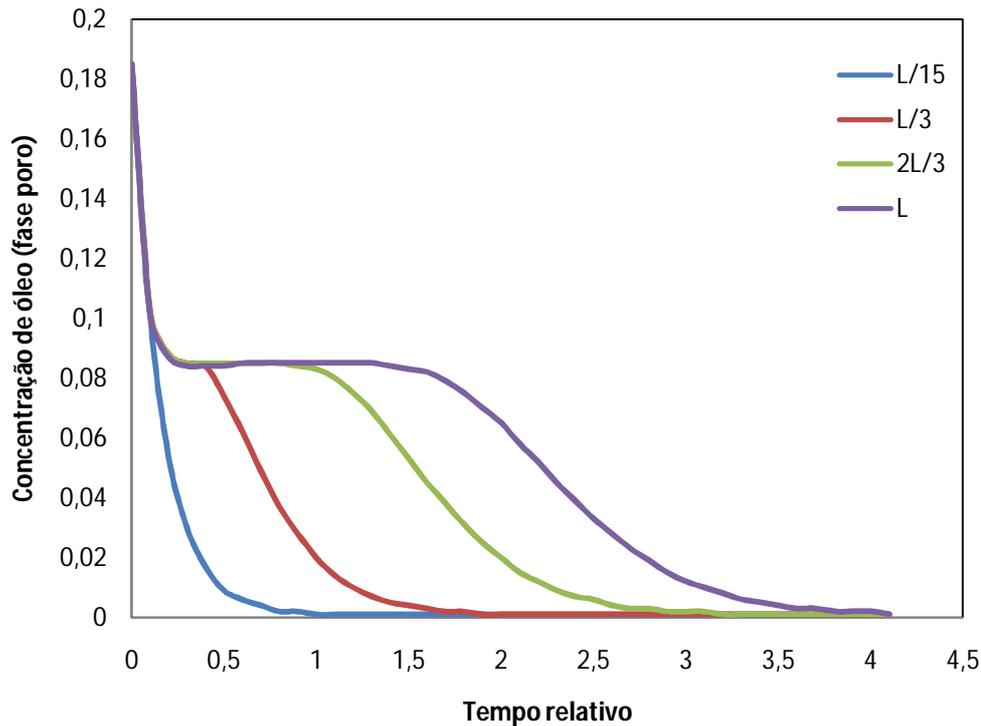


Figura 3.8 Variação da concentração de óleo (C_p) para $\varepsilon_b=0,5$, $\varepsilon_p=0,4$ e $C_p^0=18,5\%$.

Parâmetros do regime básico:

$$a_p=34,28(\text{l/m}) \quad d_p=0,005(\text{m}) \quad C_{in}=0,001 \quad \varepsilon_b=0,5 \quad \varepsilon_p=0,4 \quad V_{in}=0,005(\text{m/s})$$

$$E_d=0,41 \quad t_f=300(\text{s}) \quad D_{AB}=0,00001(\text{m}^2/\text{s}) \quad \mu=0,032(\text{Kg}/(\text{m.s}))$$

$$\rho = 680(\text{Kg}/\text{m}^3) \quad C_p^0=0,185$$

Verifica-se também as alterações no processo de extração com a modificação do E_d que era menor nas simulações anteriores, porém agora usa-se o valor experimental (FÁBIO, 2007).

Com o aumento do valor da constante de equilíbrio entre a fase sólida e poro, mantendo os dados anteriores iguais, pode-se observar na figura 3.9 um aumento de concentração de óleo em micela, porém também houve um acréscimo no tempo de extração.

O mesmo ocorre para a concentração de óleo na fase poro, conforme figura 3.10, onde tem-se uma maior concentração de óleo com acréscimo de tempo na conclusão do processo de extração.

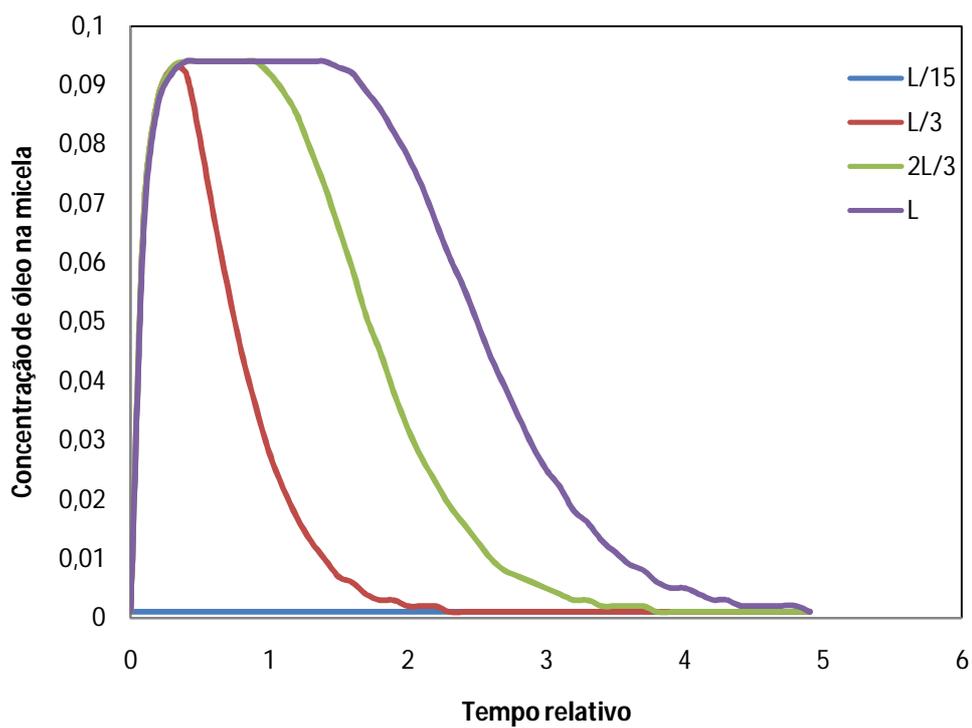


Figura 3.9 Variação da concentração do óleo (C) em micela com alteração do E_d .

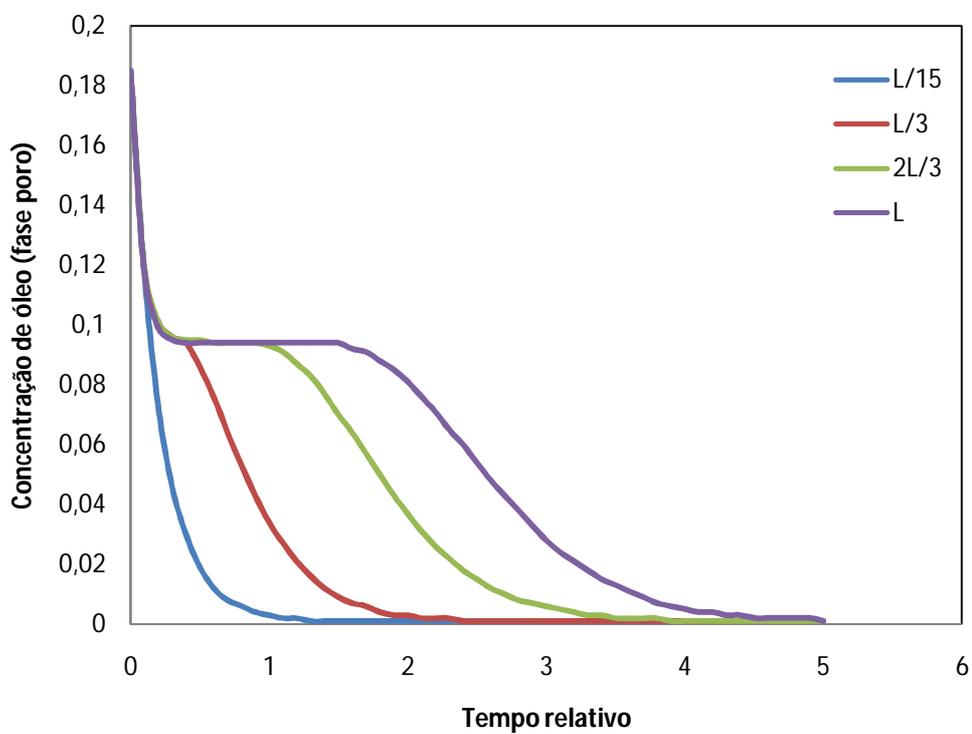


Figura 3.10 Variação da concentração de óleo (C_p) com alteração do valor do E_d .

A área específica de contato (a_p) entra as fases poro e “bulk” é um fator importante a ser considerado na extração. A área específica de contato será maior quanto menor for a partícula de matéria-prima utilizada no processo de extração. Desta forma, ocorrerá uma maior difusão entre as fases pois a micela alcança com mais eficiência as cavidades internas.

Pode-se observar este fenômeno na figura 3.11, onde o a_p foi modificado, aumentando a área específica de contato. Verifica-se uma concentração maior de óleo em micela em um tempo mais reduzido, pois com o aumento da área específica de contato é possível extrair mais facilmente e com mais eficiência.

O mesmo ocorre com a concentração de óleo na fase poro, onde na figura 3.12 observa-se que C_p obteve uma concentração máxima maior e o processo de extração ocorreu mais rapidamente.

Parâmetros do regime básico:

$$a_p=68(1/m) \quad d_p=0,005(m) \quad C_{in}=0,001 \quad \varepsilon_b=0,5 \quad \varepsilon_p=0,4 \quad V_{in}=0,005(m/s)$$

$$E_d=0,41 \quad t_f=300(s) \quad D_{AB}=0,00001(m^2/s) \quad \mu=0,032(Kg/(m.s))$$

$$\rho = 680(Kg/m^3) \quad C_p^0=0,185$$

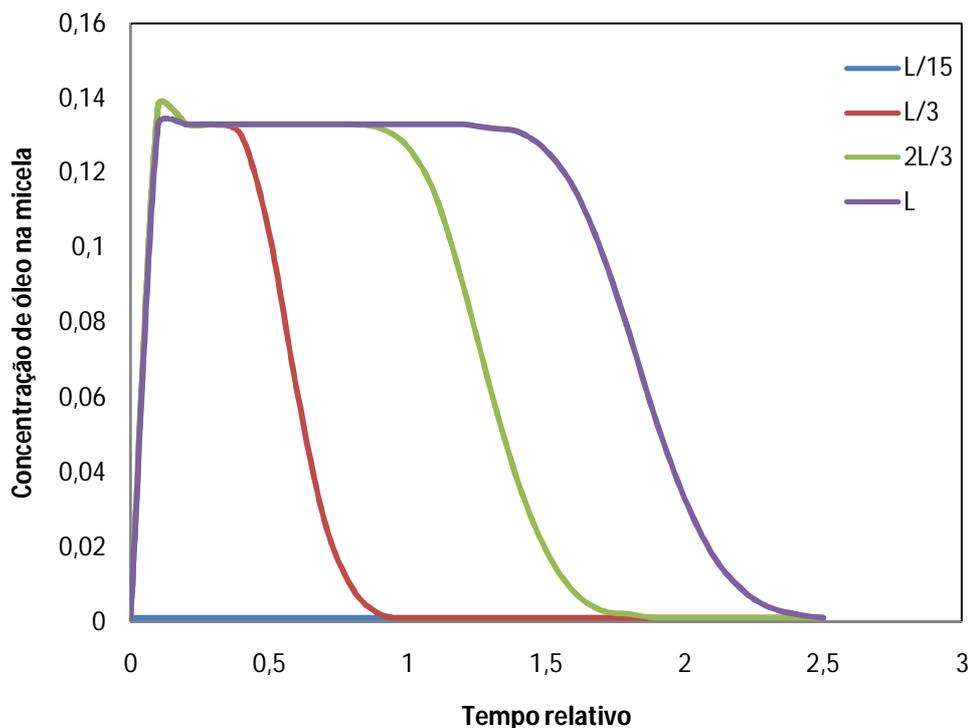


Figura 3.11 Variação da concentração do óleo (C) em micela devido o aumento na a_p .

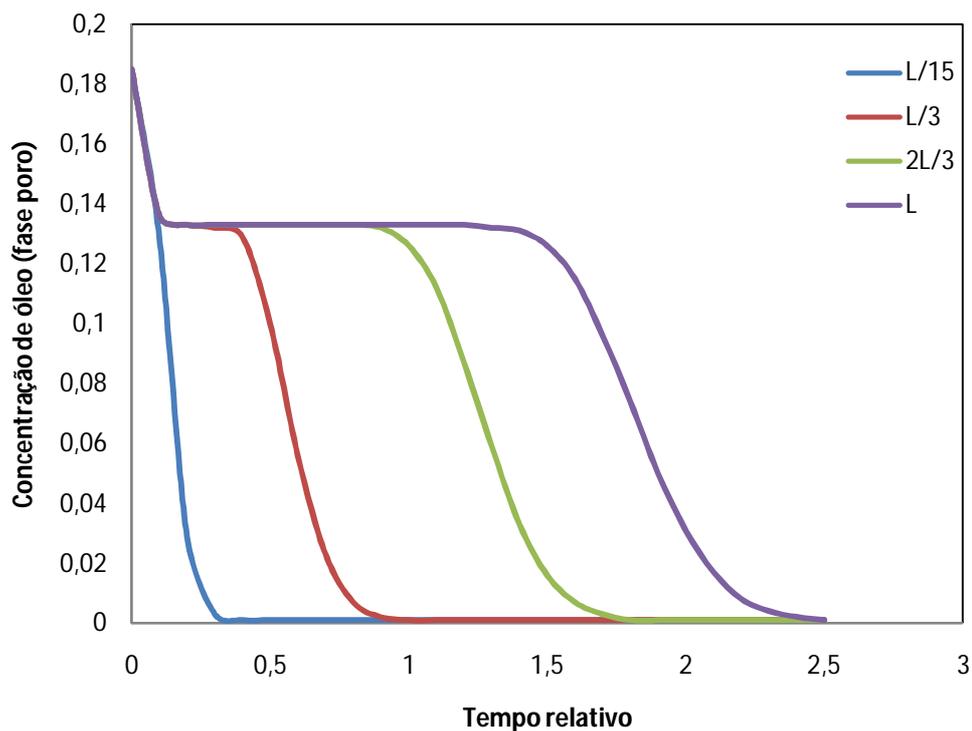


Figura 3.12 Variação da concentração de óleo (C_p) devido a um aumento do a_p .

As simulações realizadas até o momento utilizaram como solvente o hexano. Também desenvolveu-se uma análise utilizando o metanol e o etanol como solventes no processo de extração, visto que possuem um menor preço e existe uma grande oferta em todo território brasileiro.

Parâmetros do regime básico para o:

METANOL

$$a_p=68(\text{l/m}) \quad d_p=0,005(\text{m}) \quad C_{in}=0,001 \quad \varepsilon_b=0,5 \quad \varepsilon_p=0,4 \quad V_{in}=0,005(\text{m/s})$$

$$E_d=0,41 \quad t_f=300(\text{s}) \quad D_{AB}=0,00001(\text{m}^2/\text{s}) \quad \mu=0,062(\text{Kg}/(\text{m.s}))$$

$$\rho = 961(\text{Kg}/\text{m}^3) \quad C_p^0=0,185$$

Parâmetros do regime básico para o:

ETANOL

$$a_p=68(\text{l/m}) \quad d_p=0,005(\text{m}) \quad C_{in}=0,001 \quad \varepsilon_b=0,5 \quad \varepsilon_p=0,4 \quad V_{in}=0,005(\text{m/s})$$

$$E_d=0,41 \quad t_f=300(\text{s}) \quad D_{AB}=0,00001(\text{m}^2/\text{s}) \quad \mu=0,129(\text{Kg}/(\text{m.s}))$$

$$\rho = 959(\text{Kg}/\text{m}^3) \quad C_p^0=0,185$$

Nas figuras 3.13 e 3.14 observa-se a quantidade máxima de óleo que cada solvente em análise consegue extrair. Comparando com o hexano, o metanol e o etanol demonstraram uma menor capacidade de extração, utilizando um tempo maior para concluir este processo.

Entre o metanol e o etanol, conclui-se que o metanol apresenta uma maior eficiência, pois contém uma maior concentração de óleo na micela do que o etanol e também conclui o processo de extração em menor tempo.

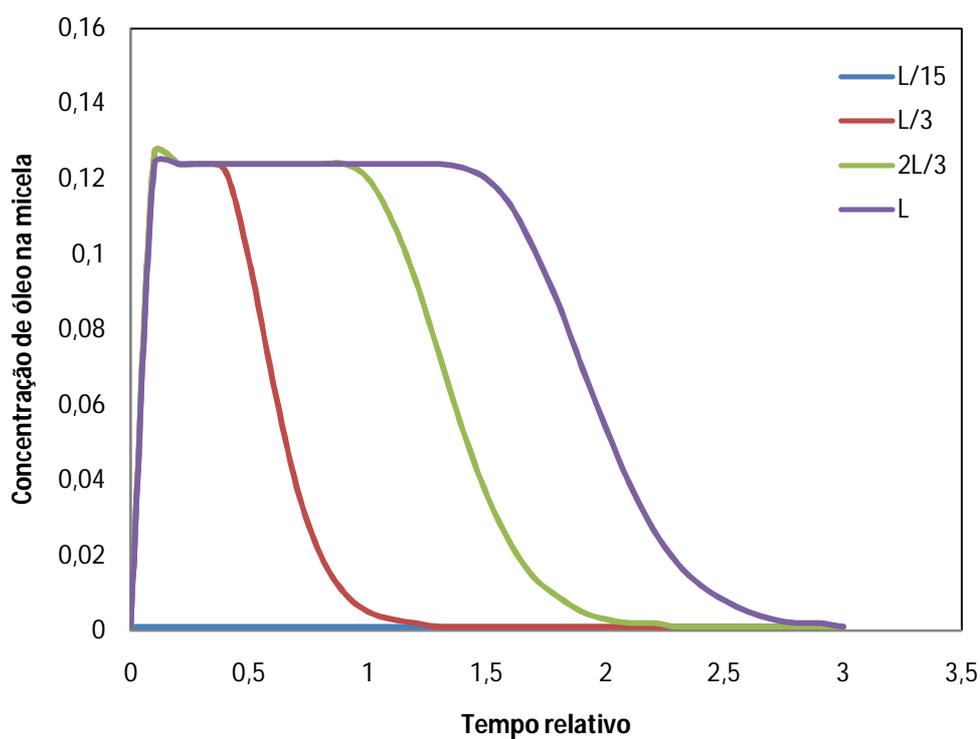


Figura 3.13 Variação da concentração do óleo (C) em micela com o uso de metanol.

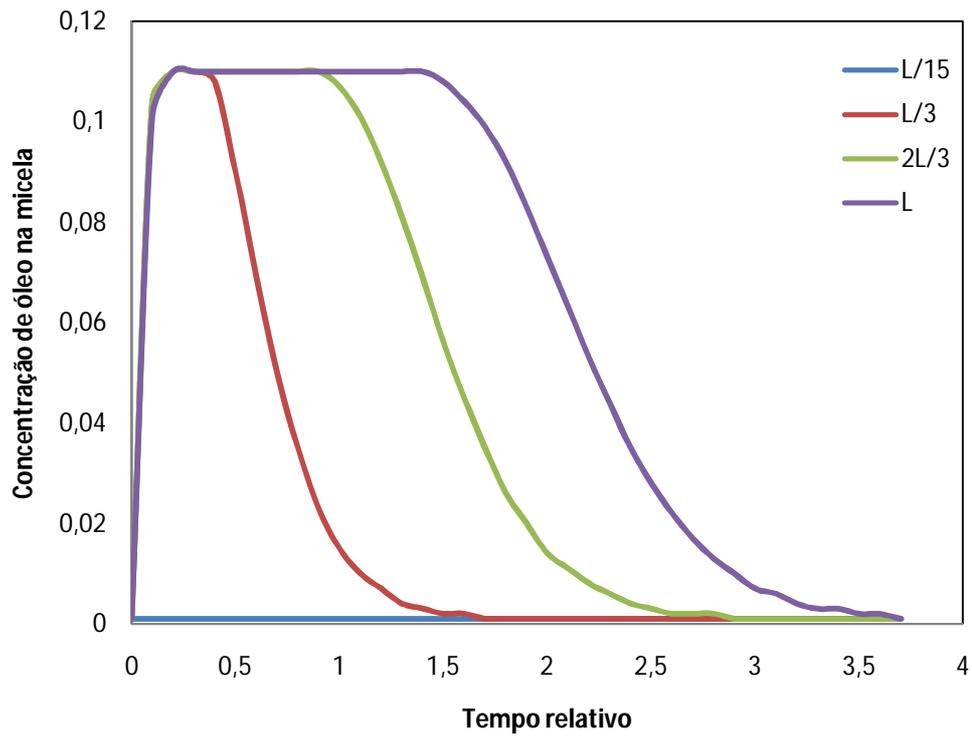


Figura 3.14 Variação da concentração do óleo (C) em micela com o uso do etanol.

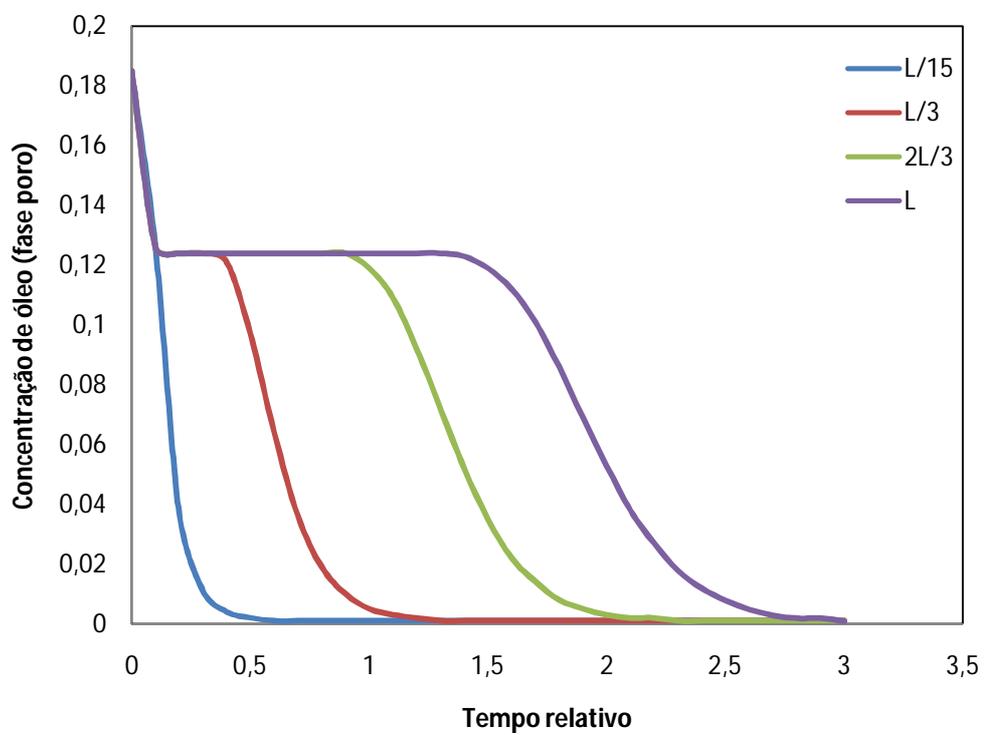


Figura 3.15 Variação da concentração do óleo (C_p) com o uso de metanol.

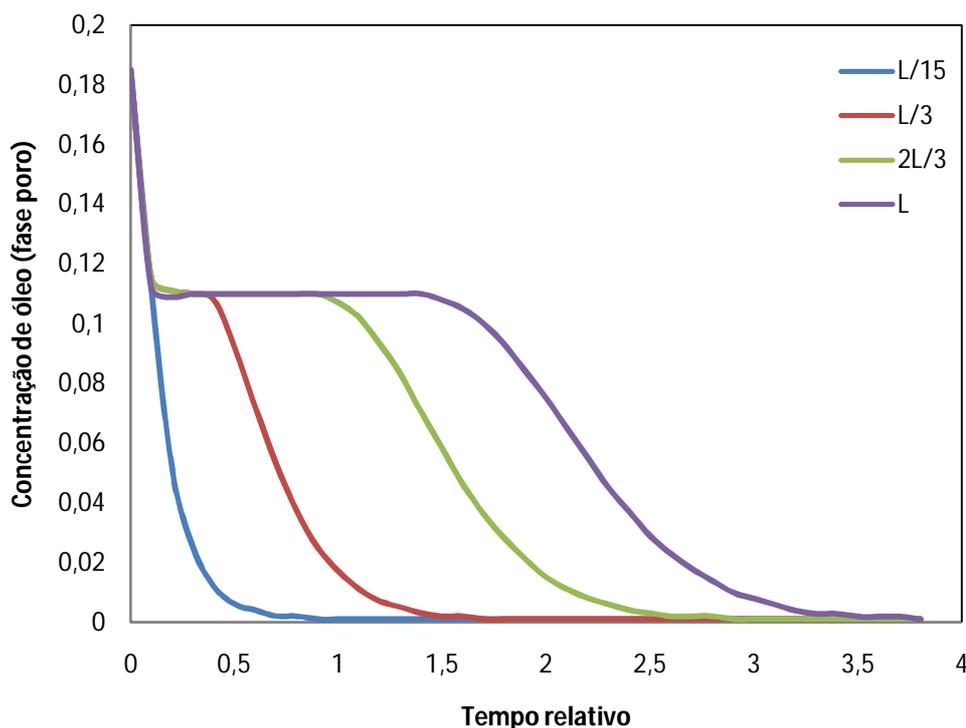


Figura 3.16 Variação da concentração do óleo (C_p) com o uso de etanol.

Na figura 3.15 e 3.16 pode-se observar o comportamento da concentração poro no decorrer da extração. Nota-se que com o uso do metanol há uma maior concentração de óleo na fase poro do que com o uso do etanol, sendo que o tempo para a conclusão do processo de esgotamento do óleo da fase porosa é menor com o uso do metanol.

O girassol é uma das quatro maiores culturas oleaginosas produtoras de óleo vegetal comestível em utilização no mundo. É uma cultura que tem alto potencial para a produção de combustível vegetal, pois tem um alto índice de óleo no grão.

Diante disto, faz-se uma análise do comportamento no processo de extração do óleo de girassol, usando o método de volumes finitos, com dados obtidos da literatura (BLEY, 2007).

O girassol apresenta características específicas diferentes da soja, onde pode-se observar uma área específica de contato menor, o que favorece a extração; um diâmetro da partícula também menor, porém a porosidade poro e porosidade “bulk” do girassol é maior que o da soja, o que nos leva a deduzir que isso implicará num menor valor da concentração de óleo na micela.

Observa-se também que no caso do girassol a constante de equilíbrio entre as fases sólida e poro é maior que na soja. Em se tratando de girassol sabe-se que a quantidade de óleo na semente é grande e varia entre 38% a 47%, porém no trabalho a concentração inicial na matéria-prima (torta de girassol) é de 19%, pois antes da extração por solvente, o girassol passa pela prensagem e o que resta de óleo na torta de girassol é então extraído por solvente.

Parâmetros do regime básico para o uso do girassol:

$$a_p=23(1/m) \quad d_p=0,0025(m) \quad C_{in}=0,001 \quad \varepsilon_b=0,646 \quad \varepsilon_p=0,437$$

$$E_d=0,83 \quad \mu=0,129(Kg/(m.s)) \quad \rho = 670(Kg/m^3) \quad C_p^0=0,19$$

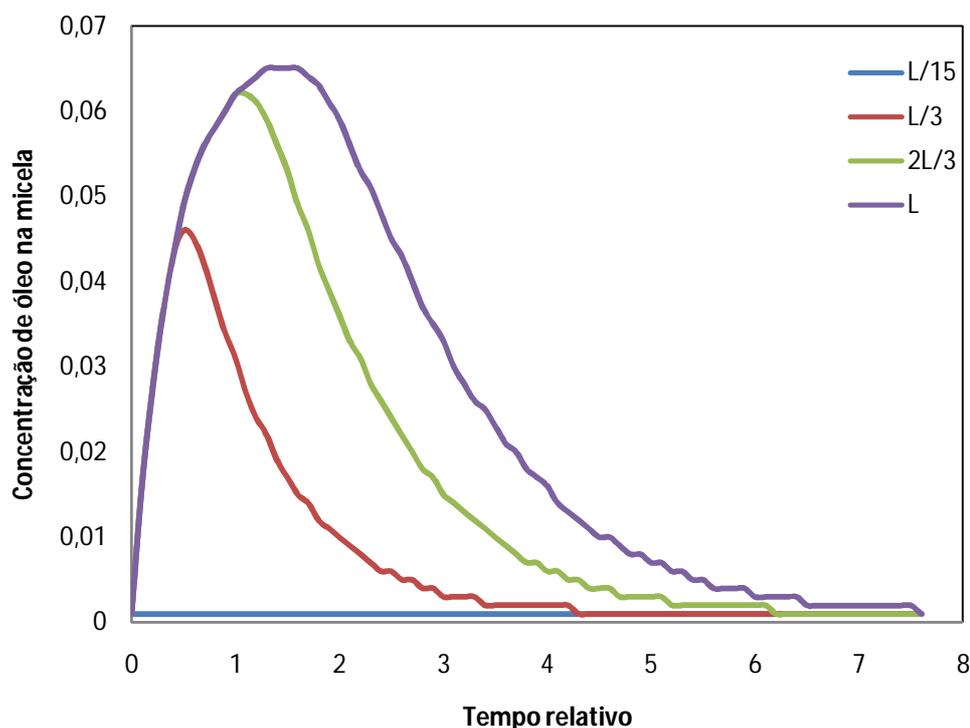


Figura 3.17 Variação da concentração do óleo (C) em micela com girassol.

Na extração do girassol, na figura 3.17 observa-se, em comparação com a soja, uma menor concentração de óleo na micela, sendo que o percentual inicial de óleo na matéria-prima tanto para a soja como para o girassol era praticamente o mesmo (18,5% para a soja e 19% para o girassol). Pode-se observar também um maior tempo destinado ao processo de extração.

Na figura 3.18 apresenta-se o comportamento do óleo na matéria-prima ou concentração poro (C_p), onde observa-se uma diminuição a medida que o óleo migra para a micela. No girassol como na soja tem-se na etapa inicial, uma rápida migração de óleo da matéria-prima, porém este processo de migração do óleo da matéria-prima girassol é mais demorado.

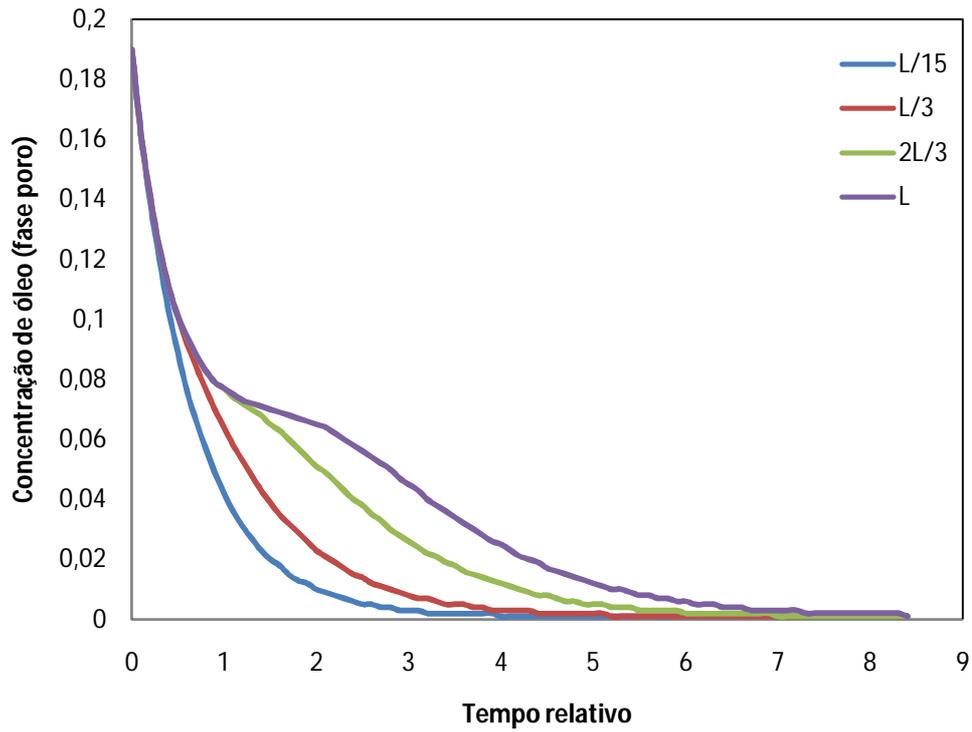


Figura 3.18 Variação da concentração do óleo (C_p) com girassol.

CONCLUSÃO

Levando-se em conta o trabalho desenvolvido, pode-se fazer algumas considerações finais:

A análise bibliográfica nos mostra a importância da cultura da soja no nosso país bem como a necessidade de constantes melhorias no setor da indústria de extração de óleos vegetais. Baseado nisso, o objetivo principal do trabalho foi comparar os resultados de extração já existentes com os resultados obtidos com o uso do método de volumes finitos.

Foi composto um esquema físico do processo de extração de óleo vegetal em leito fixo e desenvolvido um modelo matemático utilizando volumes finitos.

Foi utilizado o programa S.V. PATANKAR para realizar as simulações numéricas.

Conforme as simulações foram obtidos os seguintes resultados:

- A concentração de óleo na fase “bulk” e fase poro foi maior com o uso de volumes finitos.
- Com o aumento da porosidade poro e porosidade “bulk” houve uma menor concentração de óleo em micela e um aumento de tempo para finalizar a extração.
- Uma maior concentração de óleo na matéria-prima ocorre também um aumento considerável na concentração de óleo na fase “bulk”.
- Com o aumento do valor da constante de equilíbrio entre a fase sólida e fase poro ocorre um aumento de concentração de óleo na micela.
- Aumentando-se a área específica de contato entre a fase poro e fase “bulk” verifica-se uma concentração maior de óleo na micela, pois desta forma é possível extrair com mais facilidade e eficiência.
- Comparando com o hexano, o metanol e o etanol demonstraram uma menor capacidade de extração, utilizando um tempo maior para concluir o processo de extração.
- Verifica-se que o metanol apresenta uma maior eficiência de extração se comparado com o etanol.

- Na extração do girassol pode-se observar um maior tempo de extração com um patamar menor de concentração de óleo na micela.
- Sobre o desenvolvimento do tema no futuro, pode-se realizar simulações utilizando o programa levando em consideração a recirculação da micela, também as equações em volumes finitos aplicados em equipamentos reais como Rotocell, D'Smet, etc..., principalmente uma simulação a partir do aplicativo CFX, que também trabalha com volumes finitos.

REFERÊNCIAS

- ABIOVE. **Complexo Soja – Estatística Mensal Ano Safra 2007/2008**. Disponível em: <http://www.abiove.com.br/estatistica_br.html>. Acesso 15/10/2007.
- ABIOVE. **Para entender a Moratória da Soja: o cultivo responsável**. Disponível em: <http://www.abiove.com.br/sustent/ms_cprodutor_24jul07.pdf>. Acesso em 15/10/2007.
- ABOISSA. **Óleos vegetais**.1999. Disponível em:< <http://www.aboissa.com.br/girassol/>>. Acesso em 17/04/2007.
- ABRAHAM, G., Horn, R.J., Koltin, S. P., 1998. **Modeling the solvent extraction of oilseeds**. JAOCS. V.65, I, Champaing, jan. pp.129-135.
- AOAC. **Official Methods of Analysis of the Association Analytical Chemist**. 14 Ws. Washington, DC.1984.
- ATLAS SÓCIOECONÔMICO RIO GRANDE DO SUL. **Evolução da soja no RS**. Disponível em: <<http://www.scp.rs.gov.br>>. Acesso em 03/07/2007.
- BENETTI, R.C. **Modelagem matemática dos processos nos trechos horizontais do extrator “crown-model” e sua identificação**. Ijuí. 132p. Dissertação de Mestrado. DEFEM. Unijuí, 2001.
- BERNARDES, J. **Extração de óleo vegetal com álcool**. Disponível em: <http://www.usp.br/agen/bols/2005/rede_1613_HTML>. Acesso em 17/04/2007.
- BLEY, J. H. **Modelagem matemática da extração de óleo de girassol por solvente**. Dissertação de Mestrado. UNIJUÍ. 2007.
- CAMPEN, J. **Soja: matéria-prima industrial**. <<http://www.embrapa.br>>. Acesso em 17/04/2007.
- CUMINATTO, J. A., MENEGUETTE JR., M. **Discretização de Equações Diferenciais Parciais. Técnicas de diferenças finitas**. USP. São Paulo. 2002.

FERREIRA, J. R., CRISTO, C. M. P. N., **O futuro da indústria: biodiesel: coletânea de artigos**– Brasília: MDIC-STI/IEL, 2006. 145p.:Il.-(Série Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior,14)

GAZZONI, D. **Biodiesel – Bons caminhos para a soja também no mercado interno.**, Disponível em: http://revistarural.com.br/edicoes/2006/artigos/rev99_biodiesel.htm> Acesso 03/07/2007.

KRIOUKOV, V.G., VELOSO, G.O., THOMAS, G.C., **Mathematical model of vegetal oil extraction in moving bed.** Proceedings of the seventh Latin-American Congress of Heat and Mass Transfer, vol. 3, Salta, Argentina, 1998, pp.661-666.

LAMBERT, J. D. **Numerical Methods for Ordinary Differential Systems- The initial Value Problem**, John Wiley Sons New York, 1993, 283p.

LANDGRAF, L. **A soja é um alimento completo?** Disponível em:< <http://www.embrapa.br>>. Acesso em 17/04/2007.

MAJUMDAR, G. C. et al. **Modeling solvent extraction of vegetable oil in a packed bed**, JAOCS, Campaing, v.t, n.9, p.971-979, 1995.

MALISKA, C. R., **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacionais.** Rio de Janeiro: LTC, 1995, 424p.

MERRIL, G. **A soja no Brasil.** Disponível em: <<http://www.cnpsa.embrapa.br/producao soja/SojanoBrasil.htm>>. Acesso em 03/07/2007.

MIYASAKA,S.,MEDINA,J.C. **A soja no Brasil. Capítulo XV- Industrialização da soja.** 1981,pp.916-975.

MOREIRA, L. G. **Modelagem matemática do processo de extração de óleo vegetal por solvente em extrator de leito fixo.** Ijuí. 83p. Dissertação de Mestrado. DEFEM. Unijuí, 1998.

PARENTE, E. J.de S. et al. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado.** Fortaleza: Tecbio, 2003. 68p.

PATANKAR, S. V., **Numerical heat transfer and fluid flow.** Hemisphere Publishing Corporation, McGraw-Hill Book Company. 1980.197p.

PAULA,S.R.,FILHO,P.F. **Panorama do Complexo Soja.** Assistente técnico e gerente da Gerência Setorial de Estudos de Agroindústria do BNDES.

PIVA, C. **Modelagem matemática dos processos no trajeto conexivo do extrator “Crown-model” e simulações numéricas.** Dissertação de Mestrado. UNIJUÍ. 2001.

PLANETA ORGÂNICO. **Soja orgânica.** Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/index.php?op_pag=99&cod_pai=16>. Acesso em 19/07/2007.

PRESIDENTE DA REPÚBLICA. Lei nº11.097, de 13 de janeiro de 2005. Disponível em <www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004_2006/2005/Lei/L11097.htm>

PRODANOFF, J. H. A. **Avaliação da Poluição difusa gerada por enxurradas no meio Urbano.** Teste de Doutorado. UFRJ. 2005.

REVISTA AGROANALYSIS – A REVISTA DO AGRONEGÓCIO DA FGV. Edição nº 10, volume 26, out/2006. *Sustentabilidade Agroenergia Biodiesel para auto-consumo*. Décio Luiz Gazzoni e Paulo Henrique N.Felici.

SCHULZ, J. A. T., LEITE, O. F. P., CARDOSO, W. L., PEREIRA, L. F. F., SOUTO, H. P. A., **Formulação semi-implícita para o transporte de massa no escoamento bifásico de um meio poroso**. IX Encontro de Modelagem Computacional. Belo Horizonte, MG. 2006.

THAME, M. **Biodiesel de óleo de soja no Brasil**. Disponível em: <http://www.gaia_movement.org/Article.asp?Txt=287 Sub Menu Item ID=136 Menu Item ID=55> Acesso em 03/07/2007.

THOMAS, G. C., KRIOUKOV, V. G., VIELMO, H.A., **Simulation of vegetable oil extraction in counter-current crossed flows using the artificial neural network**, Chemical Engineering and Processing 44, p. 581-592, 2005.

THOMAS, G. C., VELOSO, G. O., KRIOUKOV, V. G., **Mass transfer modelling in counter-current crossed flows in a industrial extractor**, Food and Bioproducts Processing 85, p. 77-84, 2007.

THOMAS, G.C. **Análise teórico-experimental da extração de óleo em instalação do tipo “rotocell”**. Porto Alegre. 125p. Tese de Doutorado. UFRGS, 2003.

THOMAS, G.C. **Modelagem matemática da extração de óleo em instalação do tipo “rotocell”**. Ijuí. 105p. Dissertação de Mestrado. DEFEM. Unijuí, 1999.

VELOSO, G. O. **Modelagem física e matemática dos processos de extração de óleo de soja em fluxos contra corrente cruzados**. Tese de Doutorado. UFRGS. 2003.

VELOSO, G. O., KRIOUKOV, V. G., VIELMO, H.A., **Mathematical modeling of vegetable oil extraction in a counter-current crossed flow horizontal extractor**, Journal of Food Engineering 66, p. 477-486, 2005.

VELOSO, G.O. **Modelo matemático evolutivo 2D na extração de óleo vegetal por solvente em extrator industrial do tipo “De Smet”**. Ijuí. 109p. Dissertação de Mestrado. DEFEM. Unijuí, 1999.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)