



MODELAGEM VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DA INTERFACE CONTAMINADA NA TRANSFERÊNCIA EM BATELADA EM LONGOS POLIDUTOS COM EXPANSÕES

João Américo Aguirre Oliveira Jr.

Laboratório de Mecânica dos Fluidos Aplicada e Computacional (LAMAC), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Rua Sarmento Leite, 425, 90050-170, Porto Alegre/RS, Brasil - aguirre@mecanica.ufrgs.br

Sérgio Luiz Frey

Laboratório de Mecânica dos Fluidos Aplicada e Computacional (LAMAC), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Rua Sarmento Leite, 425, 90050-170, Porto Alegre/RS, Brasil - frey@mecanica.ufrgs.br

Felipe Bastos de Freitas Rachid

Laboratório de Mecânica Teórica e Aplicada (LTMA), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, Niterói/RJ, 24210-240, Brasil - rachid@mec.uff.br

Resumo. *O transporte de diferentes produtos de petróleo ou diferentes graduações de um mesmo produto através de longos dutos é realizada pela batelada destes produtos em continua sucessão; tanto empregando-se separadores mecânicos (usualmente “pigs”) entre os produtos quanto simplesmente deixando-os misturarem-se em interfaces de batelada. Essa zona misturada implica sempre em custos adicionais devido à necessidade de reprocessamento dos produtos, logo deve ser minimizada. Tanto a ordem dos fluidos quanto acidentes na linha de transporte contribuem para um aumento desse volume contaminado. Acidentes tais como expansões ou contrações no diâmetro aparecem em junções ou obstruções ao longo do poliduto. Obstruções na linha podem ser evitadas através de um eficiente programa de manutenção; entretanto expansões ou contrações na linha são algumas vezes necessárias devido a requerimentos de projeto. A minimização desse tipo de inconveniente é um item relevante no projeto de poliduto. No presente trabalho é simulada a transferência em batelada de derivados de petróleo através de um poliduto com expansões através do método de elementos finitos utilizando-se a aproximação chamada Streamline Upwind/Petrov-Galerkin (SUPG). O tema principal é computar, via simulação numérica, a contribuição do acidente na interface de contaminação para dois produtos de petróleo considerados fluidos newtonianos, incompressíveis num escoamento laminar.*

Palavras-chave: *elementos finitos, SUPG, transferência em batelada, engenharia de petróleo.*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Transferência de derivados de petróleo

A transferência em batelada de diferentes derivados de petróleo ou diferentes graus do mesmo derivado em longos polidutos é uma prática corrente em todo o mundo. Através de longas linhas de transmissão os produtos do petróleo são transferidos das refinarias até os pontos de distribuição ou

aplicação. A transferência desses produtos é feita usando-se separadores mecânicos (como “pigs”) ou simplesmente deixando-os misturarem-se em interfaces de batelada quando os separadores mecânicos se tornam inconvenientes.

Polidutos de petróleo são longos dutos de grande diâmetro usados para transferir diferentes produtos através de longas distâncias em contínua sucessão ou, em outras palavras, em batelada. Na transferência em batelada diferentes produtos de petróleo, tais como gasolina e diesel, são transferidos na mesma tubulação sequencialmente.

O uso de separadores mecânicos evita a contaminação das espécies mas em alguns casos é inviável. Isso acontece quando estações ou subestações de bombeamento estão presentes ou quando existem acidentes na linha, tais como expansões ou contrações, devido à complexa operação necessária para a colocação e retirada do separador da linha nesses pontos. Esses acidentes podem ser causados por obstruções ou por alterações no diâmetro da tubulação, um eficiente programa de manutenção pode evitar o primeiro caso mas o segundo é, às vezes inevitável devido à necessidades do projeto.

Neste caso a transferência em batelada é realizada sem um separador mecânico, então existe uma interface direta entre os diferentes produtos onde aparece um volume contaminado, uma mistura dos produtos, que altera as características de cada espécie. Esse volume contaminado precisa ser enviado de volta à refinaria para um novo processamento e toda essa operação implica em gastos adicionais que aumentam o preço final dos derivados de petróleo.

Os acidentes na linha, previamente discutidos, contribuem para o aumento do volume misturado, então uma análise do escoamento através de uma longa linha com esse tipo de característica deve ser feita para que se determine a melhor ordem para os fluidos serem transferidos e para otimizar o projeto da linha e desse tipo de acidente afim de minimizar sua contribuição para a contaminação dos diferentes derivados reduzindo o custo de toda a operação.

O objetivo desse trabalho é justamente um estudo do processo que culminará em uma correlação de engenharia que irá prever (calcular) o volume contaminado d uma transferência em batelada em uma linha longa com expansões, levando em consideração características do escoamento (número de Reynold), dos diferentes fluidos (número de Schmidt) e da geometria da expansão na tubulação (razão de aspecto). Essa correlação será determinada por uma simulação numérica via método de elementos finitos utilizando a formulação SUPG (Streamline Upwind/Petrov-Galerkin) do processo da transferência em batelada de fluidos newtonianos e incompressíveis como no esquema da Fig (1).

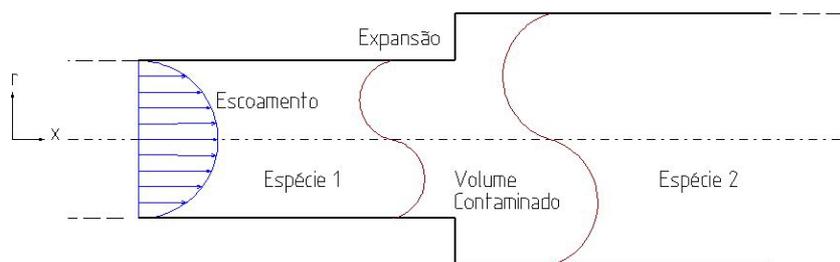


Figura 1. Esquema do problema a ser resolvido.

2. TRANSFERÊNCIA DE MÚLTIPLAS ESPÉCIES

Partindo-se de um balanço de massa em um volume de controle diferencial e pelo princípio da conservação de massa temos que:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho dV = \int_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{\Gamma} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho dV = 0 \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, Ω o domínio do volume de controle, Γ as superfícies do volume de controle e $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}$ a componente do vetor velocidade normal às superfícies de controle. Das Eqs. (1) e (2) temos então que:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{\Gamma} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA = 0 \quad (3)$$

De onde se pode ver claramente o balanço de massa dentro do volume de controle dado que a variação da massa no interior do volume de controle é igual ao fluxo líquido de massa na superfícies de controle.

A partir da Eq. (3) utilizando-se a transformação de Green pode-se chegar a:

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) \right] dV = 0 \quad (4)$$

Para o problema de transporte de n espécies a Eq. (4) toma a forma:

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial \rho_{(i)}}{\partial t} + \text{div}(\rho_{(i)} \mathbf{v}_{(i)}) - r_{(i)} \right] dV = 0 \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (5)$$

onde o termo $r_{(i)}$ representa a geração da espécie i . Isso implica que para cada ponto do domínio o balanço de massa para a espécie i .

$$\frac{\partial \rho_{(i)}}{\partial t} + \text{div}(\rho_{(i)} \mathbf{v}_{(i)}) = r_{(i)} \quad (6)$$

Pode-se agora reescrever a Eq. (6) em termos de um fluxo mássico das espécies i em respeito à velocidade média de massa definida como:

$$\mathbf{j}_{(i)} \equiv \rho_{(i)} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho_{(i)}}{\partial t} + \text{div}(\rho_{(i)} \mathbf{v}) + \text{div} \mathbf{j}_{(i)} = r_{(i)} \quad (8)$$

Os dois primeiros termos da Eq. (8) podem ser combinados e reescritos como:

$$\frac{\partial \rho_{(i)}}{\partial t} + \text{div}(\rho_{(i)} \mathbf{v}) = \rho \frac{D_{(v)} C_{(i)}}{Dt} \quad (9)$$

reescrevendo a Eq. (8) como:

$$\rho \frac{D_{(i)} C_{(i)}}{Dt} + \text{div} \mathbf{j}_{(i)} = r_{(i)} \quad (10)$$

A lei de Fick para difusão mássica é dada por:

$$\mathbf{j}_{(i)} = D_{ij} \nabla \rho_{(i)} = \rho D_{ij} \nabla C_{(i)} \quad (11)$$

Aplicando-se a Eq. (11) na Eq. (10) temos que:

$$\rho \frac{D_{(i)} C_{(i)}}{Dt} + \rho D_{ij} \Delta C_{(i)} = r_{(i)} \quad (12)$$

$$\rho \left(\frac{\partial C_{(i)}}{\partial t} + \nabla C_{(i)} \cdot \mathbf{v} \right) + \rho D_{ij} \Delta C_{(i)} = r_{(i)} \quad (13)$$

$$\frac{\partial C_{(i)}}{\partial t} + \nabla C_{(i)} \cdot \mathbf{v} + D_{ij} \Delta C_{(i)} = R_{(i)} \quad (14)$$

Onde $R_{(i)}$ é a taxa de geração do componente i mássica por unidade de massa e D_{ij} é a difusividade mássica de i em j .

Esta é a equação do transporte de massa para dois componentes i e j que será resolvida em função de um campo de velocidades pré calculado para a obtenção do campo de frações mássicas.

3. FORMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS

Para solução numérica dos campos de velocidade e fração mássica, como descrito acima, das espécies foi utilizado o método de elementos finitos, com uma formulação SUPG aplicando os subespaços finitos comuns \mathbf{V}_h, P_h (Brooks e Hughes, 1982), e W_h (Franca et al., 1992):

Encontrar o trio $(\mathbf{v}_h, p_h, \omega_{(i)h}) \in \mathbf{V}_h \times P_h \times W_h$ tal que

$$B(\mathbf{v}_h, p_h, \omega_{(i)h}; \mathbf{u}, q, w) = F(\mathbf{u}, q, w), \quad (\mathbf{u}, q, w) \in \mathbf{V}_h \times P_h \times W_h \quad (15)$$

onde

$$B(\mathbf{v}_h, p_h, \omega_{(i)h}; \mathbf{u}, q, w) = \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + [\nabla \mathbf{v}] \mathbf{v}, \mathbf{u} \right) + (2\nu \mathbf{D}(\mathbf{v}), \mathbf{D}(\mathbf{u})) - (\nabla \cdot \mathbf{u}, p) - (\nabla \cdot \mathbf{v}, q) \\ + (\mathbf{v} \cdot \nabla \omega_{(i)}, w) + (D_{ij} \nabla \omega_{(i)}, \nabla w) \quad (16)$$

e

$$F(\mathbf{u}, q, w) = (\mathbf{f}, \mathbf{u}) + (\mathbf{S}_h, \mathbf{u})_{\Gamma_h} + (R_{(i)}, w) + (J_{(i)h}, w)_{\Gamma_h} \quad (17)$$

aplicando-se os termos da formulação SUPG temos então:

$$B(\mathbf{v}_h, p_h, \omega_{(i)h}; \mathbf{u}, q, w) = \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + [\nabla \mathbf{v}] \mathbf{v}, \mathbf{u} \right) + (2\nu \mathbf{D}(\mathbf{v}), \mathbf{D}(\mathbf{u})) - (\nabla \cdot \mathbf{u}, p) - (\nabla \cdot \mathbf{v}, q) \\ + (\mathbf{v} \cdot \nabla \omega_{(i)}, w) + (D_{ij} \nabla \omega_{(i)}, \nabla w) \\ + \sum_{K \in C_h} ([\nabla \mathbf{v}] \mathbf{v} + \nabla p - 2\nu \nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{v}), \tau(\text{Re}_K)([\nabla \mathbf{u}] \mathbf{u} - \nabla q))_K \\ + \sum_{K \in C_h} (\mathbf{v} \cdot \nabla \omega_{(i)} - D_{ij} \Delta \omega_{(i)}, \alpha(\text{Pe}_K^m) \mathbf{v} \cdot \nabla w)_K \quad (18)$$

e

$$\begin{aligned}
F(\mathbf{u}, q, w) = & (\mathbf{f}, \mathbf{u}) + (\mathbf{S}_h, \mathbf{u})_{\Gamma_h} + (R_{(i)}, w) + (J_{(i)h}, w)_{\Gamma_h} \\
& + \sum_{K \in C_h} (\mathbf{f}, \tau(\text{Re}_K)([\nabla \mathbf{u}] \mathbf{u} - \nabla q))_K + \sum_{K \in C_h} (R_{(i)}, \alpha(\text{Pe}_K^m) \mathbf{v} \cdot \nabla w)_K
\end{aligned} \tag{19}$$

com o parâmetro de estabilidade $\tau(\text{Re}_K)$, dependente do número de Reynolds de elemento Re_K como definido em Franca and Frey (1992), e o parâmetro de estabilidade $\alpha(\text{Pe}_K^m)$, dependente do número de *Peclet de malha para transferência de massa* (Slattery, 1999) $\alpha(\text{Pe}_K^m)$ como definido em Franca et al. (1992).

4. MODELO MECÂNICO

O modelo mecânico utilizado é um duto bidimensional com um escoamento axissimétrico com um perfil de velocidades de entrada já desenvolvido com uma expansão de diâmetro no centro de seu comprimento, no qual é injetado um derivado de petróleo e em um dado tempo $t=0$ passa a ser injetado um segundo derivado sem alterar o campo de velocidades, conforme a Fig. (2) abaixo.

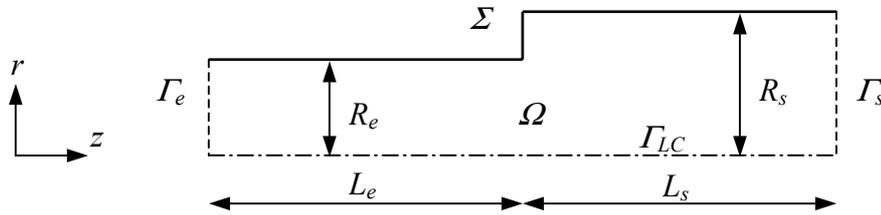


Figura 2. Esquema representativo do domínio do problema.

O domínio é axissimétrico em relação a z sendo Γ_e a seção de entrada no duto, Γ_s a seção de saída, Γ_{LC} a linha de centro da simetria, Σ as paredes do duto e Ω o domínio dado por:

$$\partial\Omega = \Gamma_e \cup \Gamma_s \cup \Gamma_{LC} \cup \Sigma \tag{20}$$

a condição inicial é que todo o duto esteja tomado pela 1ª espécie ou seja:

$$C_A(r, z, t = 0) = 1, \forall r \in [0, R] e z \in [0, L] \tag{21}$$

o que impõe:

$$C_B(r, z, t = 0) = 0, \forall r \in [0, R] e z \in [0, L] \tag{22}$$

Como já foi citado, o escoamento (campo de velocidades) foi previamente calculado segundo as seguintes condições de contorno:

$$\mathbf{v}(r, z) = 0 \text{ em } \Sigma \tag{23}$$

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_z = 0 \text{ em } \Gamma_{LC} \tag{24}$$

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_z = v_m \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right); \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_r = 0 \text{ em } \Gamma_e \tag{25}$$

onde $v \cdot e_z$ é a componente do vetor velocidade na direção axial (z), $v \cdot e_r$ é a componente do vetor velocidade na direção radial (r) e v_m é a velocidade na linha de centro, definida como máxima pela simetria e pelo perfil de velocidades dado.

Esse campo de velocidades foi imposto ao problema de fração mássica que foi gerado a partir da condição de que a partir de um tempo $t=0$ iniciou-se a injeção da segunda espécie, tendo isso como condição de contorno do problema transiente.

$$C_B(r, z = 0, t) = 1 \text{ em } \Gamma_e \text{ para } t \geq 0 \quad (26)$$

5. RESULTADOS NUMÉRICOS

Utilizando-se o modelo mecânico descrito no item anterior, foram gerados resultados numéricos utilizando-se o código comercial ANSYS 5.7 com licença do Centro Nacional de Supercomputação (CESUP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, num microcomputador Pentium III com um processador de 1.1 GHz e com 1 Gb de memória RAM do Laboratório de Mecânica dos Fluidos Aplicada e Computacional (LAMAC).

Os resultados numéricos do campo de velocidades foram gerados previamente para um escoamento em regime permanente, utilizando-se a suposição feita anteriormente, e depois foram aplicadas as condições de fração mássica para solução do problema transiente para a mistura.

No caso analisado o domínio Ω foi definido com as seguintes características:

$$R_e = 0.254m \quad (27)$$

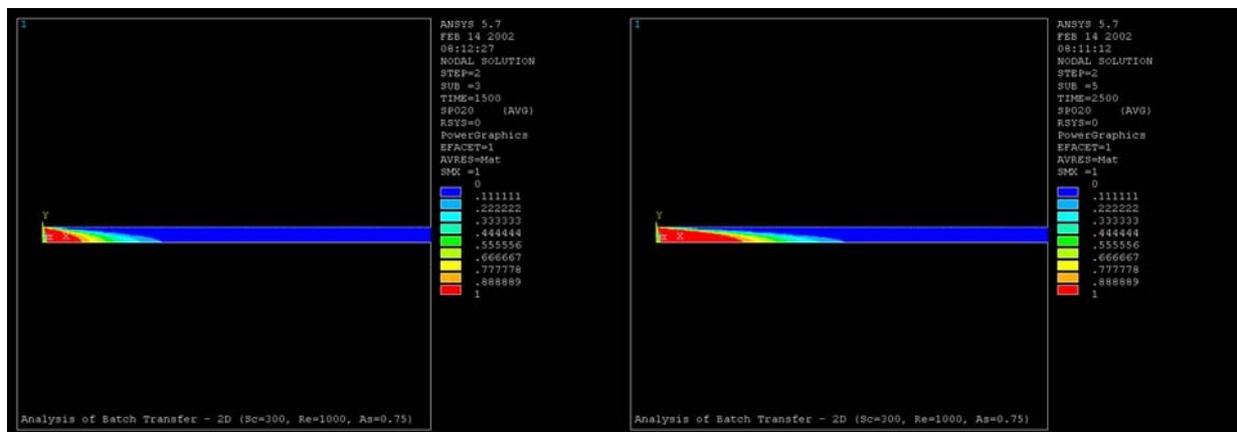
$$R_s = 0.4064m \quad (28)$$

$$L_e = L_s = 25m \quad (29)$$

e como condição de velocidade:

$$v_m = 0.001 \frac{m}{s} \quad (30)$$

gerando os seguintes resultados:



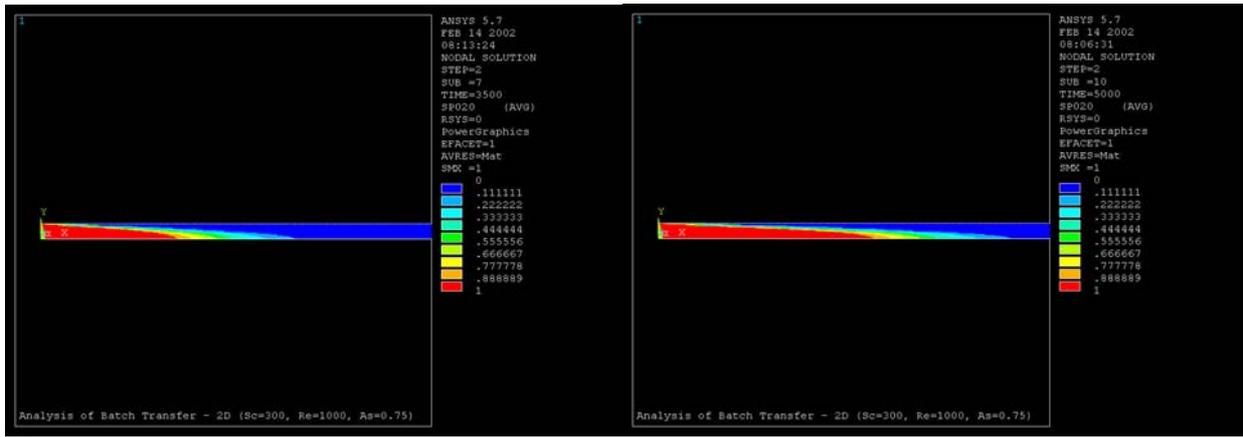


Figura 3. Formação do perfil de mistura na entrada do duto para tempos selecionados.

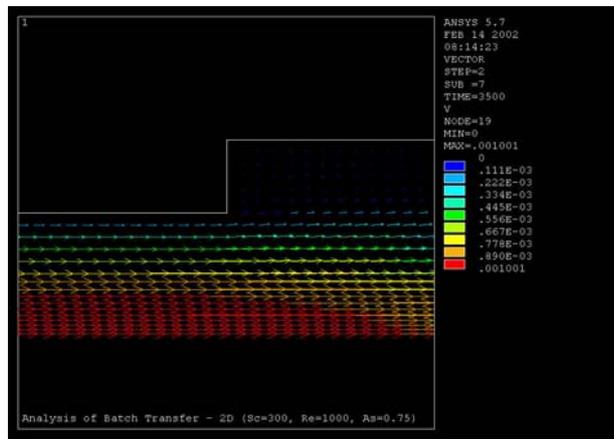


Figura 4. Detalhe do campo de velocidades utilizado para o problema da mistura.

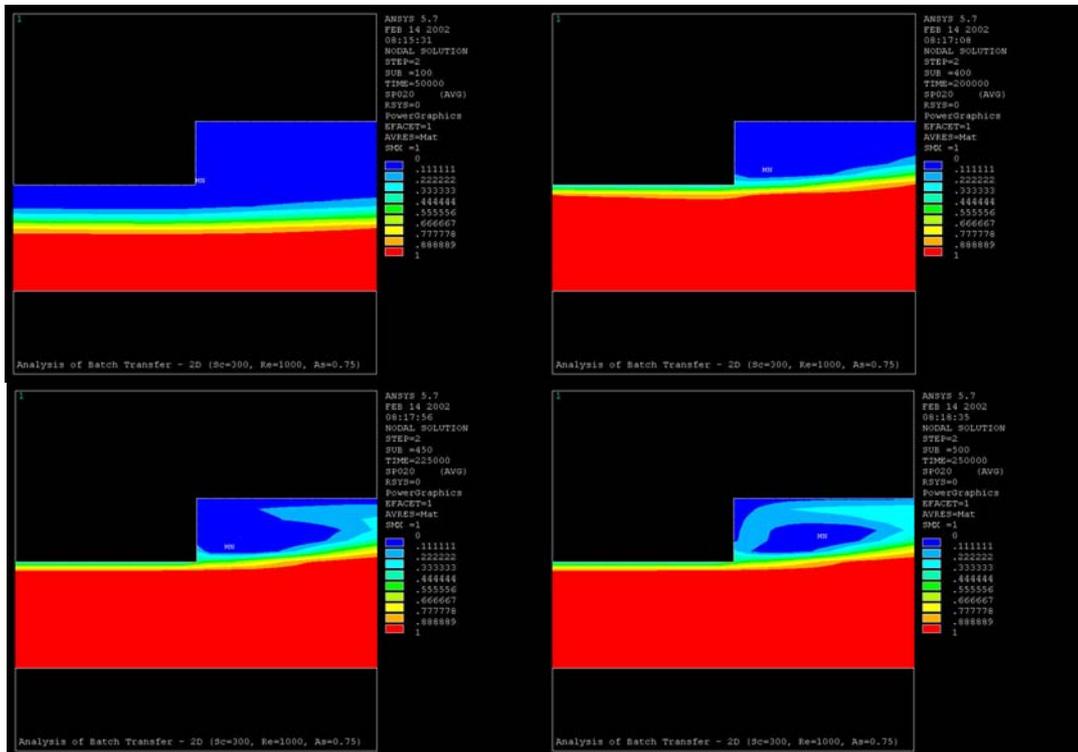


Figura 5. Campo de fração mássica na expansão para tempos selecionados.

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Pela análise dos resultados numéricos obtidos percebe-se a formação de um perfil de contaminação que, conforme esperado, segue o perfil de velocidades do escoamento e nos pontos de recirculação temos a formação de um acúmulo de mistura que vai contaminando os produtos aumentando assim o volume misturado. Esses resultados foram gerados, conforme já citado, para um escoamento laminar, porém as velocidades do escoamento real na transferência em batelada são bem maiores do que as utilizadas aqui gerando escoamentos bastante turbulentos, o que altera significativamente o campo e o perfil de velocidades, alterando a mistura.

Numa próxima etapa deste trabalho será realizada uma análise turbulenta do escoamento para então aplicar-se sobre este escoamento as condições de fração mássica para analisar mais realisticamente a mistura das espécies. Assim para testes com diferentes geometrias de dutos e diferentes propriedades dos produtos transportados será gerada a correlação desejada.

7. AGRADECIMENTOS

O autor Sérgio Frey agradece o apoio financeiro provido pela agência CNPq através do processo de nº 350747/93-8.

O autor João Américo Aguirre Oliveira Jr. agradece o apoio financeiro provido pela agência FAPERGS através do processo de nº 00515309.

8. REFERÊNCIAS

Brooks, A.N., Hughes, T.J.R. , 1982 "Streamline Upwind/Petrov-Galerkin formulations for convective dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* Vol. 32, pp. 199-259.

Franca, L. P., Frey, S. e Hughes, T.J.R., 1992, "Stabilized finite element methods: I. Application to the advective-diffusive model", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 95, pp. 253-276.

Franca, L.P. and Frey, S., 1992, "Stabilized finite element methods: II. The incompressible Navier-Stokes equations", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 99, pp. 209-233.

Slattery, J. C., 1999, "Advanced Transport Phenomena", Cambridge University Press, U.S.A.

Tetra Pak Processing Systems Ab., "Dairy Processing Handbook". Sweden: Teknotext AB, 1995.

Rachid, F.B., Araujo, J.H.C. and Baptista, R.M., 2000, "Estimating mixing volumes between batches in multiproduct pipelines", *International Pipeline Conference*, Calgary, Alberta, Canada.

Rachid, F.B., Araujo, J.H.C. and Baptista, R.M., 2000, "Interface contamination modeling in pipeline batch transfers", *ETCE/OMAE 2000 Joint Conference*, New Orleans – LA, USA.

INTERFACE CONTAMINATION MODELING VIA FINITE ELEMENT METHOD OF BATCH TRANSFER IN LONG PIPELINE WITH EXPANSIONS

João Américo Aguirre Oliveira Jr.

Laboratory of Applied and Computational Fluid Mechanics (LAMAC), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Rua Sarmento Leite, 425, 90050-170, Porto Alegre/RS, Brazil - aguirre@mecanica.ufrgs.br

Sérgio Luiz Frey

Laboratory of Applied and Computational Fluid Mechanics (LAMAC), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Rua Sarmento Leite, 425, 90050-170, Porto Alegre/RS, Brazil - frey@mecanica.ufrgs.br

Felipe Bastos de Freitas Rachid

Laboratory of Theoretical and Applied Mechanics (LMTA), Mechanical Engineering Department, Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, 24210-240 Niterói/RJ, Brazil - rachid@mec.uff.br

***Abstract.** The transport of different petroleum products or different grades of the same product through long pipelines is performed by batching the products in continuous succession; either employing mechanical separators (usually pigs) between products or simply letting them mix at batch interfaces. Since the mixing zone implies additional costs due to products reprocessing, interface contamination should be minimized. Both the order of the batching fluids and the pipeline accidents contribute to increase the mixing of products. Accidents such as expansions or contractions of pipeline diameter take place at joints or obstructions throughout the line. Pipeline obstructions may be minimized with an efficient maintenance program; however expansions or contractions in the line are sometimes necessary due to project requirements. The minimization of this kind of shortcoming is a relevant item in pipeline projects. In the present work, we simulate by using a finite element method, the so-called Streamline Upwind/Petrov-Galerkin approximation, a batch transfer through pipeline expansions. The main subject is to compute, via numerical simulation, the contribution of the accident in the interface contamination for incompressible Newtonian laminar flows of different petroleum products.*

***Keywords.** finite element, SUPG, batch transfer, petroleum engineering*