

Aplicação do método *volume of fluid* na determinação da espessura mínima de filme de revestimento

Minimum film thickness of slot coating with a volume of fluid technique

Ricardo Pesotti Garuzzi¹

Universidade Federal do Espírito Santo
ricardopessoti@gmail.com

Oldrich Joel Romero¹

Universidade Federal do Espírito Santo
oldrichjoel@gmail.com

Resumo. O petróleo é a base das economias industriais modernas, mas a capacidade de manter sua oferta mundial está cada vez mais difícil. Estudos indicam que essa produção eventualmente atingirá um máximo nos próximos anos. Nesse cenário, a utilização de fontes alternativas de energia é de fundamental importância para auxiliar na transição que se torna inevitável. A energia solar fotovoltaica é uma opção bastante atrativa; entretanto, ainda é cara, se comparada com as fontes tradicionais, embora essa diferença de custo tenha diminuído gradativamente ao longo das últimas duas décadas. Uma forma de tornar a fabricação da célula solar fotovoltaica mais competitiva no mercado é utilizar camadas cada vez mais finas, mas existem limites físicos próprios do método de deposição utilizado. Este trabalho apresenta a simulação numérica do processo de revestimento por extrusão de fluidos Newtonianos, utilizando o método VOF – *volume of fluid* (Hirt e Nichols, 1981) para determinar o limite de vazão mínima desse processo. Como o limite de vazão mínima é observado na superfície livre à jusante, a parte do domínio analisada se restringe a essa região, entretanto, para a incorporação dos efeitos da tensão superficial líquido/gás, é resolvido também o domínio do gás. É utilizado o modelo de viscoscapilaridade como referência para os resultados numéricos. Verifica-se que a espessura mínima de filme aumenta com o crescimento do número de capilaridade, o que significa que, para se obterem filmes mais finos, as forças de capilaridade devem ser dominantes, quando comparadas com as forças viscosas. Em termos práticos, isso pode ser obtido diminuindo-se a velocidade do processo produtivo.

Palavras-chave: VOF, escoamento bifásico, limite de vazão mínima, revestimento por extrusão.

Abstract. Oil is the base of modern industrial economies, but the capacity to maintain the world oil production is becoming difficult. Also, recent studies show that the oil production will attain a peak in the next years. In this scenario, alternative sources of energies are important to help in the inevitable transition to low carbon sources. Photovoltaic solar energy is an attractive option, but it is still expensive if compared to traditional sources, although this cost difference is becoming lower in the last decades, it is still not enough. One way to reduce the cost of solar cells is to use a thinner coating thickness. This work presents the numerical simulation of the slot coating process of Newtonian fluids, with the volume of fluid technique in order to determine the low-flow limit. The obtained numerical results compares very well with the viscoscapillary model's results. It is verified that the minimal wet coating thickness, before the defect, increases with the capillary number, which means that thinner films will be obtained if the velocity of the process is low.

Keywords: VOF, two-phase flow, low-flow limit, slot coating.

¹ Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade Federal do Espírito Santo, campus São Mateus. Rodovia BR 101 Norte, km 60, Litorâneo, 29932-540, São Mateus, ES, Brasil.

Introdução

O petróleo responde por mais de um terço da oferta global de energia primária e mais de 95% da energia utilizada nos transportes. Mas a quantidade de petróleo que pode ser extraído do subsolo é limitada, e o pico de produção global de petróleo (do inglês *peak oil*) deve ser atingido, a partir do qual a produção começa a declinar (Miller e Sorrell, 2014).

Por outro lado, os recursos petrolíferos convencionais estão em um estágio avançado de esgotamento, exigindo formas alternativas de energia e novas tecnologias, desde que a custo aceitável (Muggeridge *et al.*, 2014; Chew, 2014). A transição para formas de energia de baixo carbono é um processo longo, e, como mostrado por Goldemberg *et al.* (2014), as rendas petrolíferas são, ou devem ser, uma das formas de pavimentar essa mudança.

A energia solar, por ser uma fonte facilmente disponível, é usada, desde os tempos remotos, para aquecimento e iluminação de casas e edifícios, para geração de eletricidade, para cozimento dos alimentos, para aquecimento de água, para refrigeração solar (Xu *et al.*, 2001) e para secagem de materiais diversos, além de ser usada em uma variedade de usos comerciais e industriais, como no uso em soldagem de alumínio (Karalis *et al.*, 2005), ou na própria indústria do petróleo, para facilitar seu transporte em tubulações mediante o aquecimento (He, 2014). Essa energia pode ser utilizada por meio de duas maneiras diferentes, uma é na forma de energia térmica, mediante coletores e receptores solares (Sardeshpande *et al.*, 2011), outra é a energia solar fotovoltaica. A segunda categoria se refere à utilização das células fotovoltaicas, que são fabricadas de materiais semicondutores que transformam a radiação solar em energia elétrica pelo chamado efeito fotovoltaico. Esse efeito foi relatado por Edmond Becquerel em 1839. O material mais difundido para esse uso é o silício, e, por ser o segundo elemento mais abundante na terra, a matéria-prima para produção de células solares não é um limitante para sua fabricação. O efeito fotovoltaico acontece quando a luz solar, através de seus fótons, é absorvida pela célula fotovoltaica. A energia dos fótons é transferida para os elétrons, que ganham a capacidade de movimentar-se. O movimento dos elétrons, por sua vez, gera a corrente elétrica que pode ser convertida em corrente alternada ou armazenada para ser utilizada posteriormente (Kazmerski, 2006). A energia

fotovoltaica pode ser produzida mesmo em dias nublados ou chuvosos, entretanto, quanto maior for a radiação solar, maior será a quantidade de eletricidade produzida. As células fotovoltaicas podem ser dispostas de diversas formas, sendo a mais utilizada a montagem de painéis ou módulos solares. Além dos painéis fotovoltaicos, também se utilizam filmes flexíveis, com as mesmas características, ou até mesmo a incorporação das células em outros materiais, como o vidro. As diferentes formas com que são montadas as células se prestam à adequação do uso, por um lado, maximizando a eficiência e, por outro, se adequando às possibilidades ou necessidades arquitetônicas. O desenvolvimento da tecnologia foi impulsionado por diversos setores e motivos: a necessidade de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas; a corrida espacial de tal forma a ter com menor custo e peso a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência no espaço; a necessidade de energia para satélites; e a crise energética de 1973, dentre outros (Neosolar, 2015; Portal Solar, 2015; Portal-Energia, 2015).

A energia solar é mais cara do que a produzida por outras fontes, mas, ao longo das últimas duas décadas, a diferença de custo tem diminuído. A utilização comercial das células fotovoltaicas teve início em 1963, quando a *Sharp Corporation of Japan* começou a produzir módulos de silício cristalino e o instalou em um farol, gerando 242 Watts (Green, 2001). O domínio do silício cristalino no mercado da energia fotovoltaica é surpreendente, devido à grande variedade de materiais disponíveis, chegando a atingir um mercado superior a 90% (Tsuo *et al.*, 1999). Entretanto, o custo dessa tecnologia é ainda elevado.

Células fotovoltaicas são tecnologias em geral classificadas, de acordo com a matéria-prima utilizada e a maturidade do nível comercial (Green, 2001), em:

(a) Primeira Geração. Uso comercial do módulo com base no silício cristalino (c-Si) – tanto o cristal único (sc-Si) quanto o multicristalino/policristalino (ms-Si).

(b) Segunda Geração. Uso comercial ainda inicial (ou em estudo) – tem como base as tecnologias fotovoltaicas de filmes finos e, em geral, incluem três famílias principais: (i) Silício amorfo (a-Si) e o micromorph de silício (μ c-Si); (ii) Telureno de cádmio (CdTe); (iii) Cobre índio seleneto (CIS) e o cobre índio-gálio disseleneto (CIGS).

(c) Terceira Geração. São as tecnologias

como as células fotovoltaicas de concentração e células fotovoltaicas orgânicas que ainda estão em demonstração ou ainda não foram amplamente comercializadas, além dos novos conceitos em desenvolvimento.

Dentre as tecnologias já disponíveis, e as que estão em fase de pesquisa e desenvolvimento na área de células solares, podem ser destacadas um grupo específico de células, chamado células fotovoltaicas de filmes finos (do inglês *thin-film cells*). Essa tecnologia, abordada neste estudo, é responsável por 10% a 15% da capacidade fotovoltaica instalada no mundo (Platzer, 2012). A fabricação desses filmes é semelhante aos utilizados na produção de monitores de tela plana para computadores, telefones, televisores, ou seja, através da deposição do líquido em um substrato em movimento, que pode ser vidro ou uma película transparente. Ao contrário dos módulos cristalinos, os de películas finas são fabricados em um passo único. Os sistemas utilizados na produção desses módulos em geral custam menos para serem produzidos do que os sistemas utilizados para silício cristalino, mas têm taxas de eficiência substancialmente inferiores. Em média, as células de película fina convertem de 5% a 13% da luz solar em eletricidade, enquanto as de silício cristalino convertem de 11% a 20%. Mas, por ser uma tecnologia nova, existem oportunidades de melhorias. Então, um dos primeiros passos é entender o processo físico da deposição do filme, que é o foco do presente artigo.

A tecnologia dos filmes finos promete a diminuição do custo das células enquanto se garante a confiabilidade e durabilidade das mesmas. Utilizando-se uma quantidade menor de material, diminuindo-se o consumo de energia durante a produção das células e reduzindo-se a complexidade dos processos, pode-se garantir a produção de células de filmes finos em larga escala a um preço competitivo e acessível. Essas células se diferenciam das outras tecnologias pela espessura das lâminas de material semicondutor utilizado em suas estruturas (geralmente na faixa de 1 μm , contra 300 μm a 400 μm das células de silício cristalino), reduzindo, assim, o custo.

A fim de se obter células de alta eficiência, são crescentes os esforços para otimização do processo de fabricação, não apenas em escala laboratorial como também para fabricação de módulos em escala industrial (Vitorino, 2009). Nesse contexto, diversas técnicas de deposição de filmes têm sido testadas, tais como o *spin-*

coating, em que seu funcionamento envolve a aplicação de um líquido a um substrato, e, em seguida, pela aceleração do substrato a uma velocidade de rotação escolhida. Outra opção, que consiste na aplicação do líquido no substrato em movimento, é a técnica de *ink jet printing*, que tem seu funcionamento similar ao de uma impressora de jato de tinta, com uma cabeça de impressão com centenas de orifícios que despejam milhares de gotículas de tinta por segundo. Outras técnicas são *doctor blading*, *screen printing*, *pad printing* e a técnica de *roll-to-roll* (Krebs, 2009).

Dentre esses diferentes métodos mencionados para revestir um substrato em movimento, um dos mais eficientes e amplamente utilizado é o método de revestimento por extrusão de camada única (*slot coating*). Nessa técnica, esquematicamente ilustrada na Figura 1, o líquido preparado é bombeado escoando pela fenda de alimentação, sendo depositado no substrato, que se movimenta a velocidade constante. As superfícies da barra de revestimento, que são normalmente paralelas ao substrato, são chamadas de lábios da barra. Se a distância entre a barra de revestimento e o substrato em movimento for adequada, o líquido irá formar uma ponte entre a barra e o substrato. Essa a região de aplicação do líquido é limitada pelas superfícies sólidas da barra e do substrato e pelas interfaces a montante e a jusante.

Como a espessura da camada de líquido depositada só depende da vazão de alimentação, esse método é ideal para revestimento de alta precisão. No entanto, a qualidade do revestimento é fortemente afetada pelas condições de operação do processo, tais como velocidade e tipo de substrato (rígido, deformável, rugoso, liso, poroso, etc.), configuração da barra de revestimento, propriedades do líquido (viscosidade, tensão superficial, características elásticas, presença dos surfactantes, etc.), nível do vácuo aplicado e oscilações na bomba de alimentação do líquido e na bomba de vácuo, dentre outros. Essas características resultam em uma Janela de Operação que pode ser apresentada utilizando-se os parâmetros adimensionais número de capilaridade (Ca) e espessura de filme adimensional (h). Essa janela separa duas regiões, uma região onde o substrato revestido apresenta defeitos e é, portanto, indesejada, e outra região livre de defeitos, conforme ilustrado na Figura 2.

O número de capilaridade Ca relaciona as forças viscosas com as forças de capilaridade,

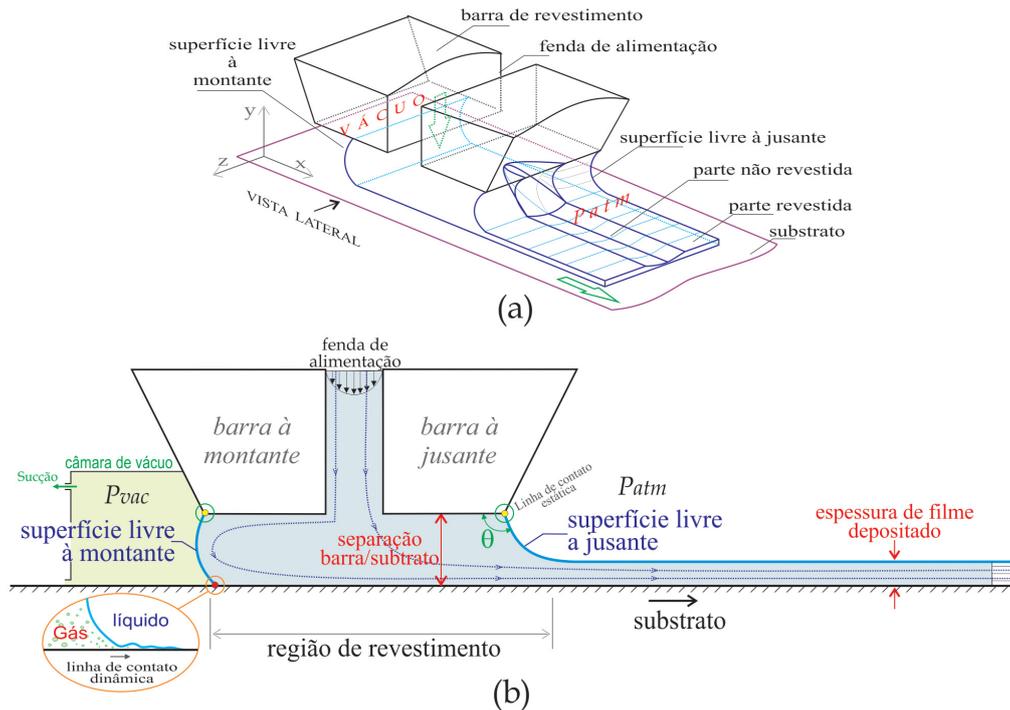


Figura 1. Configuração típica do processo de revestimento por extrusão de camada única.
Figure 1. Typical configuration of the coating process for single layer extrusion.

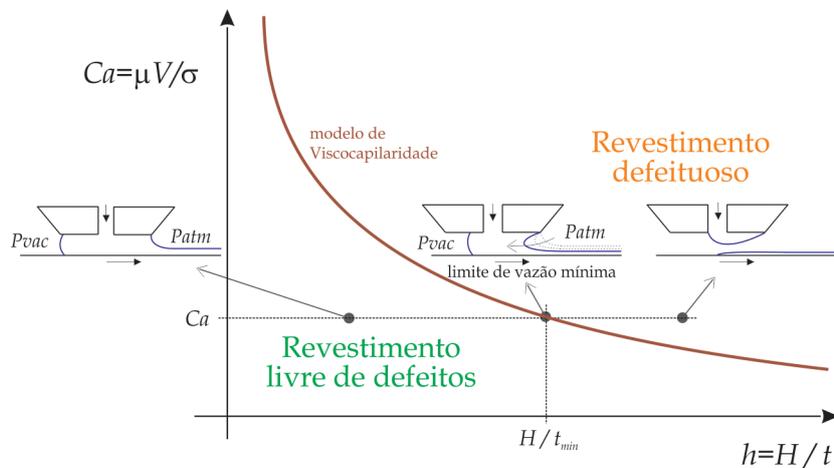


Figura 2. Janela de operação típica do processo de revestimento por extrusão.
Figure 2. Typical window operation of the extrusion coating process.

conforme detalhado nos próximos parágrafos.

Ainda na Figura 2, para um Ca e vazão de alimentação elevada, tem-se um filme úmido t espesso e, portanto, $h = H/t$ pequeno, e que pertence à região livre de defeitos. Nessas condições, existe um desperdício do material de revestimento, sendo necessária a diminuição da espessura do filme, o qual é obtido com a diminuição da vazão de alimentação. Entretanto, se a vazão é muito baixa, essa operação

resulta em uma espessura de filme t_{min} muito fina, que, eventualmente, invade a região de revestimento em sentido contrário ao movimento do substrato, resultando em defeitos no filme depositado, conforme apresentado na vista isométrica da Figura 1a desse fenômeno que é tridimensional e altamente complexo. Esse tipo de defeito é denominado de limite de vazão mínima (*low-flow limit*) e, para condições simplificadas, é descrito matematicamente

te o modelo de viscocapilaridade (Ruschak, 1976; Higgins e Scriven, 1980), definido pela Equação 1 e representado pela linha sólida na Figura 2.

$$Ca = 0,65 \left(\frac{2}{h-1} \right)^{3/2}, \quad (1)$$

sendo $h = \frac{H}{t}$.

O limite de vazão mínima ocorre no menisco a jusante quando a vazão de alimentação de líquido é diminuída (ou a velocidade do substrato aumentada) e a posição da linha de contato dinâmica mantida na região a montante da fenda de alimentação do líquido. Essa condição é altamente instável, e uma mínima redução adicional da vazão resulta em um defeito no substrato.

Existem variantes da geometria aqui descrita; configurações com diferentes formas dos lábios da barra, diferentes inclinações da barra, e diferentes números de camadas são comuns. Cada tipo tem uma aplicação determinada, e muitas empresas têm suas próprias tecnologias desenvolvidas para propósitos específicos. A explicação referente às vantagens e desvantagens de vários métodos são encontrados em Sartor (1990), Gates (1999), Romero *et al.* (2004), Romero *et al.* (2006a, 2006b), Romero e Carvalho (2008) e Krebs (2009).

Neste estudo, o problema abordado trata da modelagem computacional do processo de revestimento por extrusão com camada única utilizando fluidos Newtonianos. O domínio de interesse é a parte que contém a superfície livre a jusante, conforme detalha a Figura 3, e é selecionada porque é nessa região em que o limite de vazão mínima é observado, fenômeno que é o objetivo principal de estudo neste trabalho. Como este processo de revestimen-

to é de vazão prefixada, a determinação do limite é obtida partindo de uma vazão elevada, que permite uma espessura de filme depositada próxima do valor da separação barra/substrato de 1 mm. A vazão é diminuída gradativamente e, com isso, a espessura de filme correspondente, este processo é repetido até se observar que a interface líquido/gás se movimenta em sentido contrário ao substrato. Para os parâmetros adimensionais que controlam o problema, número de capilaridade de 1,505, 2,006 e 2,508 e número de Reynolds de 14,9, 19,9 e 24,8, tem-se que as espessuras de filme no limite são 0,395 mm, 0,420 mm e 0,465 mm, respectivamente. A superfície livre, e sua influência no processo, é determinada pelo método VOF (Hirt e Nichols, 1981) disponível no *software* comercial Fluent, para o qual o domínio é estendido incluindo uma região arbitrária de gás.

Metodologia de solução

Especificação do problema e formulação matemática

O problema a ser estudado trata da modelagem computacional do processo de revestimento por extrusão com camada única. A região de interesse é a parte que contém a superfície livre a jusante, conforme a Figura 3, e é selecionada porque é nessa região em que o limite de vazão mínima é identificado, fenômeno que é o objetivo principal de estudo neste trabalho.

Para uma dada velocidade do substrato V_w , e uma determinada separação barra/substrato H , a espessura do filme a ser depositado, t , é controlada pela vazão, q , do fluido que ingressa na barra de revestimento e independe de outras variáveis de operação – q é a vazão

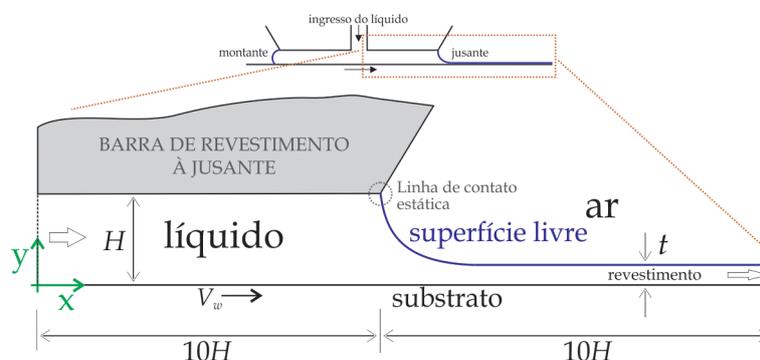


Figura 3. Principais detalhes do revestimento por extrusão de camada única.

Figure 3. Main details of the single layer downstream slot coating.

por unidade de largura da barra de revestimento, isto é $t = q/V_w$.

A separação barra/substrato utilizada neste trabalho é fixada em $H = 1$ mm. A massa específica e viscosidade do gás são adotadas como sendo $1,225 \text{ kg/m}^3$ e $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m s)}$, respectivamente. No caso do líquido, essas propriedades foram fixadas em $998,2 \text{ kg/m}^3$ e $1,003 \times 10^{-3} \text{ kg/(m s)}$, respectivamente. A tensão superficial líquido/gás é de 10^{-5} N/m .

Para o escoamento transiente, bidimensional, isotérmico e imiscível, os campos de velocidade e pressão são regidos pelas equações da continuidade e da quantidade de movimento linear, que, escritos na forma tensorial para um fluido newtoniano de densidade ρ_l e viscosidade μ_l , são representados pelas Equações 2 e 3, respectivamente

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho_l \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho_l \mathbf{g}, \quad (3)$$

\mathbf{v} é o vetor velocidade, p é a pressão, $\boldsymbol{\tau} = 2\mu_l \mathbf{D}$ é o tensor das tensões viscosas, com \mathbf{D} o tensor taxa de deformação definido como $\mathbf{D} = \frac{1}{2}[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T]$, \mathbf{g} representa o vetor aceleração da gravidade.

Os parâmetros adimensionais que tratam das forças atuantes no escoamento, que controlam o processo de solução numérica e os relacionados com a geometria, são:

- Número de capilaridade (Ca), $Ca = \frac{\mu_l V_w}{\sigma}$, que se refere à importância das forças viscosas em relação às de capilaridade;
- Número de Reynolds (Re), $Re = \rho_l V_w H / \mu_l$, que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas; e
- Espessura de filme adimensional (h), $h = \frac{H}{\tau}$.

Nessas relações, H é a separação barra/substrato, V_w é a velocidade do substrato, Δt é o passo de tempo e Δx é o tamanho de cada elemento da malha.

Abordagem numérica do problema com superfície livre

O método *volume of fluid* – VOF é utilizado para descrever o fluxo bifásico gás (g) – líquido (l). Resolve-se uma equação para determinar a fração volumétrica da fase secundária, neste caso, o líquido, α_l

$$\frac{\partial (\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}) = 0, \quad (4)$$

em cada célula do domínio discretizado, a fração volumétrica de líquido α_l pode assumir os seguintes valores:

- $\alpha_l = 0$, quando a célula está sem líquido, portanto, preenchida totalmente com gás;
- $0 < \alpha_l < 1$, quando a célula contém a interface entre o líquido e o gás. Nesse caso, um algoritmo específico é utilizado para determinar a posição da interface no interior de cada célula. Ampliação da discussão desse tópico não é escopo deste trabalho;
- $\alpha_l = 1$, quando a célula está completamente preenchida pelo líquido, portanto, sem gás.

A fração volumétrica da fase primária, que é o gás, é determinada mediante

$$\alpha_g = 1 - \alpha_l. \quad (5)$$

A massa específica ρ e a viscosidade μ utilizadas nas Equações 8 são determinadas em função das massas específicas e viscosidades das fases líquida (l) e gasosa (g), respectivamente:

$$\rho = \alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g, \quad (6)$$

$$\mu = \alpha_l \mu_l + \alpha_g \mu_g. \quad (7)$$

No contexto do VOF, as Equações 2 e 3 são aplicadas não apenas no domínio original do líquido (Figura 3), inclui-se o domínio do gás, conforme mostrado na Figura 4. Dessa forma, e introduzindo um termo de força volumétrica \mathbf{F}_{vol} que incorpora os efeitos de capilaridade, as equações ficam da seguinte forma

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (8a)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\mu}[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{vol}}, \quad (8b)$$

para tratar o termo de força volumétrica, \mathbf{F}_{vol} , dois modelos estão disponíveis, o *Continuum Surface Force* – CSF e o *Continuum Surface Stress* – CSS. O modelo CSF proposto por Brackbill *et al.* (1992), que considera a tensão superficial σ constante e forças normais à interface, é utilizado neste trabalho.

O CSF é descrito por $\mathbf{F}_{\text{vol}} = \sigma \kappa \frac{\rho \nabla \alpha_l}{\frac{1}{2}(\rho_l + \rho_g)}$, onde a

curvatura κ é determinado de $\kappa = \nabla \cdot \vec{\mathbf{n}}$, e o

$$\vec{\mathbf{n}} = \frac{\nabla \alpha_l}{|\nabla \alpha_l|}.$$

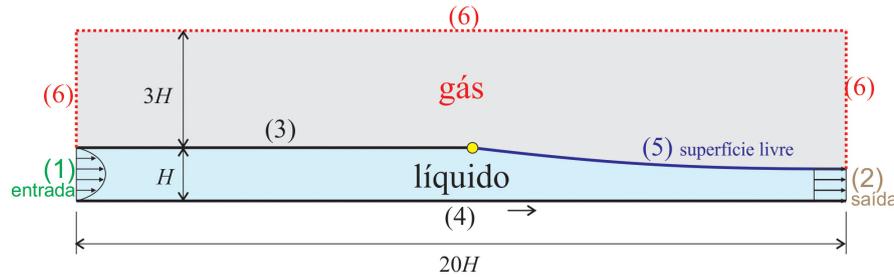


Figura 4. Domínios líquido e gás que permitem a determinação da superfície livre pela técnica VOF.
Figure 4. Liquid and gas fields that allow the determination of the free surface by the VOF technique.

Com a abordagem VOF para tratamento da superfície livre, o domínio líquido de interesse apresentado na Figura 3 é ampliado para os domínios líquido e gás, mostrados na Figura 4. Nessa nova configuração, são aplicadas as condições de contorno, as quais serão detalhadas. A região do gás não é de interesse neste problema, foi introduzida para que, mediante a metodologia VOF sejam resolvidas as frações volumétricas de líquido α_l e gás α_g e, dessa forma, se determinem a forma e a posição da superfície livre, que é o objetivo final deste trabalho. O tamanho da região gasosa, nesse caso de $3H$, é escolhido de tal forma a não perturbar os campos de velocidade e pressão da região líquida. Na configuração estendida, são aplicadas as condições de contorno, que são identificadas por números na Figura 4 e representam:

- (1) vazão de líquido Q prescrita (valores de acordo com Tabela 1) na entrada;
- (2) pressão nula no plano de saída;
- (3) parede fixa onde as condições de não escorregamento e de impenetrabilidade $u_{wall3} = 0$ e $v_{wall3} = 0$ em $y = H$ são válidas;
- (4) parede móvel, de forma similar à condição anterior, entretanto, com velocidade do substrato prescrita $u_{wall4} = V_w$ (valores de acordo com Tabela 1) e $v_{wall4} = 0$ em $y = 0$;
- (5) na superfície livre a equação

$$F_{vol} = \sigma_l \kappa \frac{\rho \nabla \alpha_l}{\frac{1}{2} (\rho_l + \rho_g)} \text{ é aplicada; e}$$

- (6) fronteiras da região do gás onde a condição de pressão prescrita é incorporada, que permitem entrada e/ou saída de gás.

Definidas a geometria e as condições de contorno, é necessário selecionar o grau de refinamento adequado para o problema. Foram utilizados três níveis de discretização, malha 1, com 8.364 elementos, malha 2, com 17.344 e malha 3, com 23.863 elementos, utilizando o *software Meshing*, da família Ansys. Para cada configuração, foi monitorada a espessura mínima de filme, sendo esses 0,495 mm, 0,420 e 0,420, respectivamente. O gráfico que compara esses valores, assim como cada grau de refinamento, é mostrado na Figura 4. Como a malha intermediária apresenta o mesmo resultado que a malha mais fina, esta é utilizada no decorrer do trabalho. Dos 17.344 elementos da malha 2, 4.336 pertencem ao domínio líquido, e 13.008, ao domínio gás, significando que o esforço computacional tem utilidade prática em $\frac{1}{4}$ do domínio. Para analisar a qualidade da malha, é utilizado o critério de qualidade ortogonal, que pode variar entre 0 e 1, sendo 0 o pior valor e 1 o melhor. Um valor aceitável é que a qualidade ortogonal seja maior do que 0,05. Neste trabalho, a qualidade ortogonal da malha é de 0,99.

O passo de tempo utilizado para o problema transiente é de 0,05 segundos, sendo necessárias 100 iterações em cada nível de tempo para atender a restrição de que o resíduo seja menor do que 10^{-4} . Ao todo, são utilizados 250

Tabela 1. Especificação dos três casos gerais estudados neste trabalho.
Table 1. Specification of the three general cases studied in this work.

Casos	Vw , m/s	Q , kg/s	Ca	Re
1	0,015	0,016 0,012 0,008 0,006 0,005 0,004	1,505	14,9
2	0,020	0,016 0,012 0,008 0,007 0,0064 0,006	2,006	19,9
3	0,025	0,016 0,012 0,010 0,009 0,008	2,508	24,8

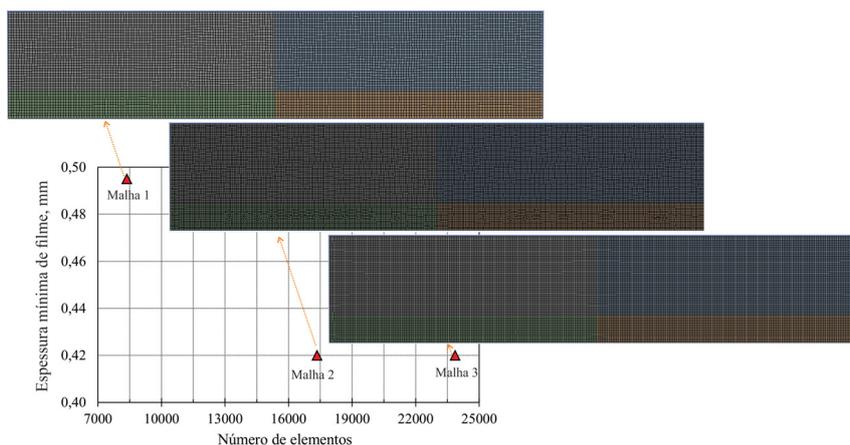


Figura 5. Teste de malha.

Figure 5. Mesh test.

passos de tempo para capturar o fenômeno de limite de vazão mínima (Figuras 6e e 6f). O passo de tempo é escolhido atendendo a restrição imposta pelo Número de Courant (Co), definido por $Co = V_w \frac{\Delta t}{\Delta x}$, que controla a convergência da abordagem explícita.

Três velocidades do substrato V_w foram utilizadas. Para cada velocidade, a vazão de alimentação do líquido Q é gradativamente diminuída, até que o limite de vazão mínima seja identificado, conforme detalhado na Tabela 1. Ao todo, 14 simulações são realizadas para se obter os três pontos na curva Ca vs. $h = H/t$ (Figura 8), sendo cada simulação obtida em um tempo de 625 segundos em um computador Windows 10 *Home Single Language* de 64 bits, com processador Intel Core i7-4500U e 8 GB de memória RAM. Os parâmetros adimensionais são apresentados em cada caso. Para auxiliar na convergência do método numérico, o número de Courant foi mantido em $Co = 16$.

Resultados e discussões

Na Tabela 2, é apresentada a sequência de simulações realizadas para o caso 2, destacando-se que, para os casos 1 e 3, o procedimento é similar e, portanto, não é mostrado.

Fixada a velocidade do substrato em 0,02 m/s, e com as propriedades do líquido e do gás detalhadas na subseção “Especificação do problema”, a vazão de alimentação de líquido Q é diminuída gradativamente a partir de 0,016 kg/s, de acordo com os valores mostrados na Tabela 2 – com isso, a espessura de filme t também diminui, ou, de forma equivalente, a espessura de filme adimensional $h = H/t$ aumenta. Na Figura 6, tem-se o registro

dessa sequência, observa-se que a curvatura da superfície livre torna-se mais acentuada perto da linha de contato estática, até o instante em que o balanço de forças é alterado devido ao aumento da importância das forças capilares resultante da curvatura acentuada do menisco, Figura 6d. A convergência do processo de solução torna-se mais difícil. Na Figura 6e, que corresponde à vazão de 0,0064 kg/s, a superfície livre se desprende da linha de contato estática e começa a invadir o canal formado pela barra e o substrato – este é o instante posterior ao início do limite de vazão mínima. Esse limite ocorre entre as vazões de 0,0070 kg/s e 0,0064 kg/s, entretanto, neste trabalho, considera-se que 0,0070 kg/s é o limite de vazão mínima, a espessura obtida é 0,420 mm, ou de forma adimensional $h_{min} = 2,381$. A rigor, simulações com valores intermediários de vazão devem ser realizados para se ter um resultado mais representativo. Esse é um refinamento que está em andamento e será apresentado em um trabalho posterior.

A espessura de filme depositado é determinada monitorando-se a massa específica do líquido na posição a 19,8 mm da entrada, na qual o filme é estável e de espessura constante.

A configuração antes de o menisco invadir a separação barra/substrato é apresentado em detalhe na Figura 7a. Já na Figura 7b, a configuração do escoamento logo após o limite de vazão mínima é apresentada. Nessa figura, os vetores velocidade na região do gás e do líquido permitem evidenciar que, após o limite de vazão mínima, o gás (α) é arrastado em direção à fenda de alimentação de líquido, criando uma região de recirculação na região inicialmente preenchida pelo líquido.

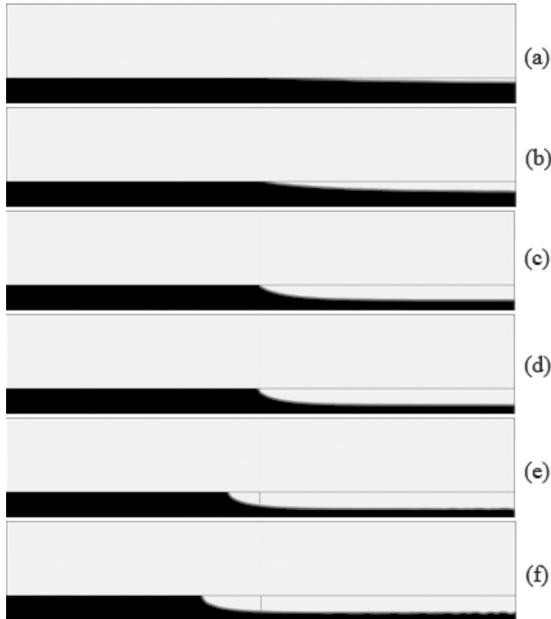


Figura 6. Forma e posição da superfície livre para diferentes vazões de alimentação de líquido (em kg/s): (a) 0,016; (b) 0,012; (c) 0,008; (d) 0,007; (e) 0,0064; e (f) 0,006. Em todos os casos, $Ca = 2,006$ e $Re = 19,9$.

Figure 6. Shape and position of the free surface for different flow rates (in kg/s): (a) 0,016; (b) 0,012; (c) 0,008; (d) 0,007; (e) 0,0064; and (f) 0,006. In all cases, $Ca = 2,006$ and $Re = 19,9$.

Tabela 2. Resultados obtidos com as condições do caso 2, para $Ca = 2,006$ e $Re = 19,9$.

Table 2. Results obtained with the conditions of case 2, $Ca = 2,006$ and $Re = 19,9$.

Caso 2: itens	Q , kg/s	t , mm	$h = H/t$
a	0,0160	0,914	1,094
b	0,0120	0,667	1,499
c	0,0080	0,444	2,252
d	0,0070	0,420*	2,381
e	0,0064	---	---
f	0,0060	---	---

O procedimento para determinar a espessura de filme adimensional $h = H/t$ em que o limite de vazão mínima para o caso 2 ocorre, com $Ca = 2,006$, é repetido para os casos 1 ($Ca = 1,505$, em que o limite de vazão mínima foi de 0,005 kg/s) e 3 ($Ca = 2,508$, com limite de vazão mínima de 0,009 kg/s). Os resultados são apresentados na Figura 8, juntamente com o modelo de viscocapilaridade obtido da Equação 1. O modelo de viscocapilaridade é utilizado apenas como referência, e não exatamente uma comparação, isso porque o

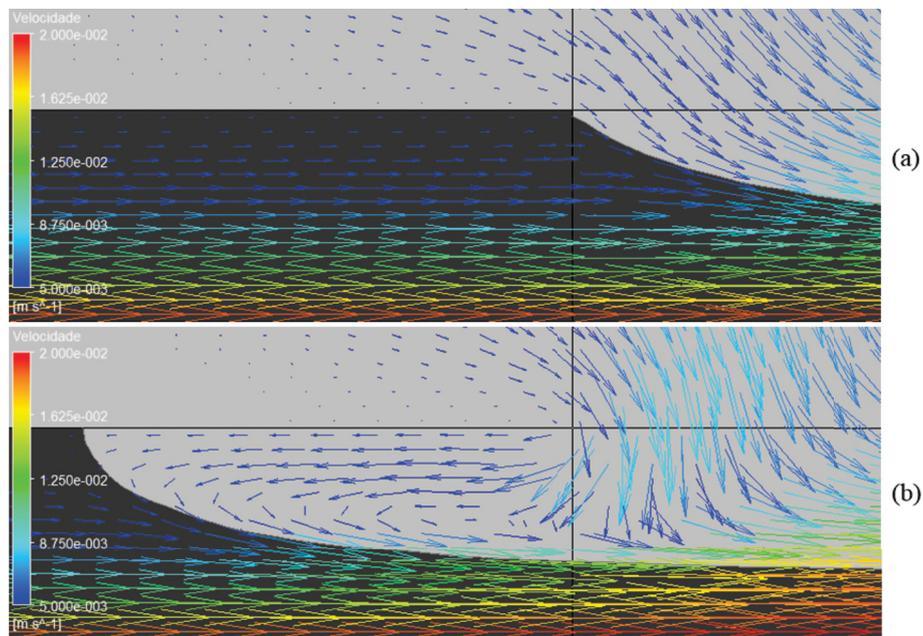


Figura 7. Captura do limite de vazão mínima que ocorre entre as vazões de 0,007 kg/s (a) e 0,006 kg/s (b), correspondentes ao Caso 2, onde $Ca = 2,006$ e $Re = 19,9$.

Figure 7. Identification of the low flow limit that occurs between 0,007 kg/s (a) and 0,006 kg/s (b), corresponding to the Case 2, where $Ca = 2,006$ and $Re = 19,9$.

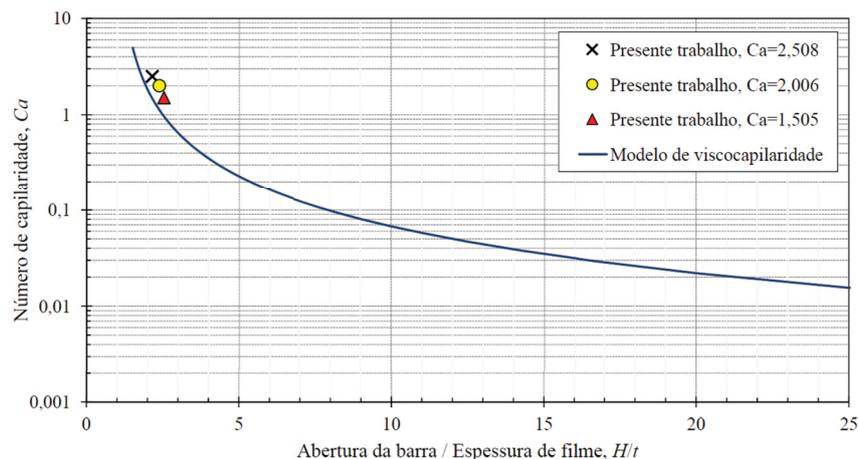


Figura 8. Número de Capilaridade em função da abertura entre a barra e a espessura do filme.
Figure 8. Capillary number as a function of the gap to film thickness ratio.

modelo analítico é unidimensional e foi derivado fazendo-se um balanço de forças na superfície livre, não incorporando efeitos de inércia. A modelagem, neste trabalho, é bidimensional, resultado de resolver as equações completas da continuidade e de Navier-Stokes, e, embora pequenos, considera, sim, efeitos de inércia.

Os resultados mostram que o aumento do número de capilaridade acarreta em uma diminuição da espessura de filme adimensional e, por consequência, em um aumento da espessura mínima de filme. De acordo com o teste de malha apresentada na seção anterior, a discrepância entre os resultados analítico e numérico é mais uma consequência das características próprias de cada abordagem do que efeito da malha propriamente.

Considerações finais

Como visto, é uma tendência mundial a busca por novas fontes de energia que possam atender ao acelerado crescimento da demanda de forma menos poluente e mais sustentável. No Brasil, tem-se diversas opções de fontes energéticas, sejam as que já estão consolidadas como as que despontam no cenário, em médio e longo prazo. No caso da geração de energia elétrica a partir de fontes fotovoltaicas, o mercado brasileiro é extremamente promissor. Além do fato de o país possuir uma posição geográfica privilegiada, que permite acesso à energia solar praticamente o ano inteiro; também dispõe da matéria-prima essencial para produção do silício utilizado na fabricação das células fotovoltaicas.

Assim, o estudo do tema é extremamente promissor, entretanto, o fator custo é ainda um desafio a superar. Nesse contexto, o trabalho aqui apresentado é direcionado para diminuir a espessura do filme depositado no substrato mediante o método de revestimento por extrusão (*slot coating*), que, após passar por etapas de secagem, cura, etc., será a célula fotovoltaica que transforma a energia solar em energia elétrica. A diminuição da espessura de filme tem impacto econômico, uma vez que menos material será utilizado para desempenhar a mesma função. Entretanto, a diminuição da espessura sem um controle apropriado tem consequências prejudiciais na qualidade final do filme revestido, e existe, portanto, um limite físico para essa espessura mínima, que é denominado limite de vazão mínima.

Neste trabalho, o microescoamento transiente, bifásico líquido – gás de um fluido Newtoniano – é investigado com a técnica VOF – *Volume Of Fluid* disponível no *software* Fluent. Os resultados são apresentados na janela de operação do processo de revestimento número de capilaridade *versus* espessura de filme adimensional, e comparados com resultados analíticos, verificando-se uma boa concordância.

De uma forma geral, o aumento do número de capilaridade (isto é, aumento das forças viscosas ou de forma equivalente, diminuição das forças de capilaridade) resulta em um aumento da espessura mínima de filme depositada no substrato em movimento, significando que não é possível diminuir a espessura de filme a valores inferiores de um valor crítico, pois existe um limite físico que controla essa redução, desta-

cando que essa restrição depende da separação barra/substrato H utilizada, que, neste estudo, foi de $H = 1$ mm. Para separação barra/substrato menores, a espessura mínima de filme obtida também diminui. Entretanto, a separação barra/substrato tem também um limite imposto pelo processo de fabricação dos equipamentos, assim como pelo processo operacional, e, por consequência, a espessura de filme obtida pelo método de revestimento por extrusão não pode ser menor do que um valor crítico.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos Professores Daniel da Cunha Ribeiro e Fábio de Assis Ressel Pereira da UFES, pelo auxílio no tratamento do escoamento multifásico no ambiente Fluent.

Referências

- BRACKBILL, J.U.; KOTHE, D.B.; ZEMACH, C. 1992. A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*, **100**(2):335-354. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991\(92\)90240-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991(92)90240-Y)
- CHEW, K.J. 2014. The future of oil: unconventional fossil fuels. *Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, physical, and engineering sciences*, **372**:20130179.
- GATES, I.A. 1999. *Slot Coating Flows: Feasibility, Quality*. Minneapolis, MN, USA. PhD thesis, University of Minnesota, 250 p.
- GOLDEMBERG, J.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.; LUCCHESI, R. 2014. Oil and natural gas prospects in South America: Can the petroleum industry pave the way for renewables in Brazil? *Energy policy*, **64**:58-70.
- GREEN, M.A. 2001. Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost. *Progress in photovoltaics*, **9**(2): 123-135. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.360>
- HE, Z. 2014. Application of solar heating system for raw petroleum during its piping transport. *Energy procedia*, **48**:1173-1180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.132>
- HIGGINS, B.G.; SCRIVEN, L.E. 1980. Capillary pressure and viscous pressure drop set bounds on coating bead operability. *Chemical Engineering Science*, **35**(3):673-682. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(80\)80018-2](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(80)80018-2)
- HIRT, C.W.; NICHOLS, B.D. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, **39**(1):201-225. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- KARALIS, D.G.; PANTELIS, D.I.; PAPAZOGLU, V.J. 2005. On the investigation of 7075 aluminum alloy welding using concentrated solar energy. *Solar energy materials and solar cells*, **86**(2):145-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2004.07.007>
- KAZMERSKI, L.L. 2006. Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview. *Journal of electron spectroscopy and related phenomena*, **150**(2-3):105-135.
- KREBS, F.C. 2009. Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques. *Solar energy materials & Solar cells*, **93**(4):394-412. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2008.10.004>
- MILLER, R.G.; SORRELL, S.R. 2014. The future of oil supply. *Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, physical, and engineering sciences*, **372**:20130179. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2013.0179>
- MUGGERIDGE, A.; COCKIN, A.; WEBB, K.; FRAMPTON, H.; COLLINS, I.; MOULDS, T.; SLINO, P. 2014. Recovery rates, enhanced oil recovery and technological limits. *Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, physical, and engineering sciences*, **372**:20120320. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2012.0320>
- NEOSOLAR. 2015. Energia solar fotovoltaica. Disponível em: <http://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica>. Acesso em: 19/10/2015.
- PLATZER, M.D. 2012. U.S. Solar Photovoltaic Manufacturing: Industry Trends, Global Competition, Federal Support. *Congressional Research Service* (7-5700, www.crs.gov, R42509) April 27, 2012, 33 p.
- PORTAL SOLAR. 2015. Energia fotovoltaica. Disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/energia-fotovoltaica.html>. Acesso em: 19/10/2015.
- PORTAL-ENERGIA. 2015. Energia solar fotovoltaica. Disponível em: <http://www.portal-energia.com/energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 19/10/2015.
- ROMERO, O.J.; CARVALHO, M.S. 2008. Response of slot coating flows to periodic disturbances. *Chemical Engineering Science*, **63**:2161-2173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2008.01.012>
- ROMERO, O.J.; SCRIVEN, L.E.; CARVALHO, M.S. 2006a. Slot coating of mildly viscoelastic liquids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **138**:63-75.
- ROMERO, O.J.; SCRIVEN, L.E.; CARVALHO, M.S. 2006b. Effect of curvature of coating die edges on the pinning of contact line. *AIChE Journal*, **52**:447-455.
- ROMERO, O.J.; SUSZYNSKY, W.; SCRIVEN, L.E.; CARVALHO, M.S. 2004. Low-flow limit in slot coating of diluted solutions of high molecular weight polymer. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **118**:137-156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2004.03.004>
- RUSCHAK, K.J. 1976. Limiting flow in a pre-metering coating device. *Chemical Engineering Science*, **31**:1057-1060. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(76\)87026-1](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(76)87026-1)
- SARDESHPANDE, V.R.; CHANDAK, A.G.; PILLAI, I.R. 2011. Procedure for thermal performance evaluation of steam generating point-focus solar concentrators. *Solar energy*, **85**(7):1390-1398. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.018>

- SARTOR, L. 1990. *Slot Coating: Fluid Mechanics and Die Design*. Minneapolis, MN, USA. Ph D thesis. University of Minnesota, 365 p.
- TSUO, Y.S.; WANG, T.H.; CISZEK, T.F. 1999. Crystalline-silicon solar cells for the 21st century. *In: Electrochemical Society Annual Meeting, Seattle, 1999. Proceedings...* p. 1-8.
- VITORINO, A.R.A.M. 2009. *Estudo de técnicas de deposição de filmes finos poliméricos à base de silanos*. Lisboa, Portugal. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciência e Tecnologia de Lisboa, 58 p.
- XU, S.M.; HUANG, X.D.; DU, R. 2001. An investigation of the solar powered absorption refrigeration system with advanced energy storage technology. *Solar energy*, **85**(9):1974-1804.

Submetido: 23/02/2015
Aceito: 21/10/2015