



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO NUMÉRICO DA FABRICAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS PELO
MÉTODO DE REVESTIMENTO POR EXTRUSÃO**

RICARDO PESSOTI GARUZZI

São Mateus - ES, março de 2017

energia.ufes.br

Mestrado em Energia

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

DISSERTAÇÃO DE Mestrado

**ESTUDO NUMÉRICO DA FABRICAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS PELO
MÉTODO DE REVESTIMENTO POR EXTRUSÃO**

RICARDO PESSOTI GARUZZI

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Energia.

Orientador: Prof. Dr. Oldrich Joel Romero.

São Mateus - ES, março de 2017

Mestrado em Energia

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Divisão de Biblioteca Setorial do CEUNES - BC, ES, Brasil)

Garuzzi, Ricardo Pessoti, 1988-
G244e Estudo numérico da fabricação de células fotovoltaicas pelo
 método de revestimento por extrusão / Ricardo Pessoti Garuzzi. –
 2017.
 119 f. : il.

Orientador: Oldrich Joel Romero.
Coorientador: Daniel da Cunha Ribeiro.
Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal
do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Escoamento bifásico. 2. Fluidos newtonianos. 3. ANSYS
(Sistema de computador). I. Romero, Oldrich Joel. II. Ribeiro,
Daniel da Cunha. III. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Universitário Norte do Espírito Santo. IV. Título.

CDU: 620.9

Mestrado em Energia

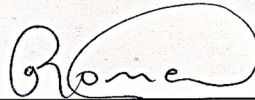
RICARDO PESSOTI GARUZZI

ESTUDO NUMÉRICO DA FABRICAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS PELO MÉTODO DE REVESTIMENTO POR EXTRUSÃO

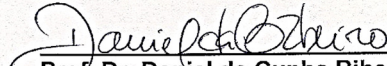
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada em 08 de março de 2017.

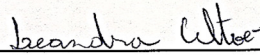
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Oldrich Joel Romero
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador



Prof.ª. Dra. Leandra Altoé
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me guiado em decisões difíceis e me ter dado forças para a conclusão desse trabalho.

Aos meus pais, Valdir Antônio Garuzzi e Maria Lucia Pessoti Garuzzi, e meus familiares por me incentivar durante a minha vida acadêmica, pelo amor incondicional, sempre me ensinando a tomar decisões corretas com o objetivo e propósito visando sempre um caminho honesto a trilhar.

Ao meu orientador Prof. Oldrich Joel Romero, pela confiança que me passou durante todo esse trabalho. Ao meu coorientador Prof. Daniel da Cunha Ribeiro, pelas contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

A todos os professores do CEUNES que me ajudaram a crescer e tornar esse sonho uma realidade.

Ao Laboratório de simulação numérica (Labsim), pela infraestrutura que possibilitou a elaboração deste trabalho.

A CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de estudo concedida.

Aos meus colegas do mestrado Rômulo Fieni Fejoli, Felipe Bezerra Marques, Giorgio Goulart, Douglas Bitencourt Vidal e Carla Salvador. Pela amizade e companheirismo durante essa jornada que parecia impossível.

A Lys Piovezan Tardin por sempre acreditar em meu potencial, nunca me deixando cair em desânimo, obrigado por tudo.

A todas as pessoas que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a execução desse trabalho.

Meu muito obrigado a todos.

RESUMO

A energia solar fotovoltaica é uma opção bastante atrativa, entretanto ainda é cara se comparada com as fontes tradicionais. Uma forma de tornar a fabricação da célula solar fotovoltaica mais competitiva no mercado é diminuindo a quantidade de material utilizado. A diminuição da espessura encontra limites físicos e operacionais associados com o método de deposição. Um deles, e que é objeto de estudo neste trabalho, é o limite de vazão mínima (*low-flow limit*). Este trabalho apresenta a simulação numérica do processo de revestimento por extrusão de fluidos newtoniano, não-newtoniano e newtoniano com partículas utilizando a técnica VOF (*Volume Of Fluid*) para determinar o limite de vazão mínima deste processo. No caso de newtoniano com partículas além do VOF é utilizada a técnica DPM (*Discrete Phase Model*). O domínio de solução das equações governantes no plano bidimensional se restringe a parte à jusante da barra de revestimento. Como resultados tem-se que o aumento do número de capilaridade resulta em um aumento da espessura mínima, e com o aumento da importância do comportamento não-newtoniano a espessura mínima de filme diminui. Para as partículas tem-se uma análise da sua concentração, com a ocorrência de um problema de alta quantidade na região do revestimento, sendo desejado que ocorra na região de interesse do filme depositado. Os trabalhos relacionados ao escoamento com fluido newtoniano foram publicados em duas revistas, como mostra os APÊNDICE A e APÊNDICE B. Além disso foi realizada uma análise econômica, também publicada, como pode ser visto no APÊNDICE C, e os detalhes constam no APÊNDICE E: GESTÃO FINANCEIRA.

Palavras-chave: revestimento por extrusão, volume of fluid, limite de vazão mínima, escoamento bifásico, newtoniano, não-newtoniano, partículas.

Abstract

Photovoltaic solar energy is a very attractive option, though it is still expensive compared to traditional sources. One way to make the most competitive photovoltaic solar cell on the market is to reduce the amount of material used. The decrease in thickness encounters physical and operational limits associated with the deposition method. One of them, and that is the object of study in this work, is the limit of minimum flow (low-flow limit). This work presents the numerical simulation of the process of coating Newtonian, non-Newtonian and Newtonian fluids with particles using the VOF (Volume Of Fluid) technique to determine the minimum flow limit of this process. In the case of Newtonian with particles besides the VOF the DPM (Discrete Phase Model) technique is used. The solution domain of the governing equations in the two-dimensional plane is restricted to the downstream part of the coating bar. As a result, the increase in capillary number results in an increase in the minimum thickness, and with increasing importance of non-Newtonian behavior the minimum film thickness decreases. For the particles there is an analysis of their concentration, with the occurrence of a problem of high quantity in the coating region, it being desired to occur in the region of interest of the deposited film. The work related to flow with newtonian fluid was published in two journals, as shown in APPENDIX A and APPENDIX B. In addition, an economic analysis, also published, as can be seen in APPENDIX C, and the details are given in APPENDIX E: FINANCIAL MANAGEMENT.

Keywords: slot coating, volume of fluid, low-flow limit, two phase flow, newtonian, non-Newtonian, particles.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Instalação fotovoltaica global acumulada até 2013.....	15
Figura 2: Aumento da demanda de células solares.	15
Figura 3: Esquema básico de uma célula fotovoltaica.	19
Figura 4: Esquema básico da montagem das células solares.....	19
Figura 5: Esquema do processo <i>casting</i>	23
Figura 6: Etapas do processo <i>spin-coating</i>	24
Figura 7: Esquema do processo <i>spin-coating</i>	25
Figura 8: Esquema do processo <i>doctor blade</i> , em que (a) vista isométrica e (b) vista lateral.	26
Figura 9: Esquema do processo <i>doctor blade</i> (aplicador em espiral).....	27
Figura 10: Esquema do processo <i>ink jet printing</i>	28
Figura 11: Esquema do processo <i>screen printing</i>	29
Figura 12: Esquema do processo <i>pad printing</i>	30
Figura 13: Vista lateral de uma configuração típica do processo de revestimento por extrusão de camada única.	31
Figura 14: Janela de operação típica do processo de revestimento por extrusão.....	33
Figura 15: Vista tridimensional de uma configuração típica do processo de revestimento por extrusão de camada única.....	34
Figura 16: Substrato revestido homogêneo (esquerda), com defeito tipo barramento ou <i>barring</i> (centro) e com defeito tipo listras ou <i>stripes</i> (direta).....	35
Figura 17: Vista lateral da região à montante da barra com a notação utilizada no modelo de viscocapilaridade.	36
Figura 18: Menisco invadindo a região de revestimento.	37
Figura 19: Modelo de inercia para espessura mínima.....	38
Figura 20: Visualização do limite de vazão mínima detalhado. (a) revestimento livre de defeitos com vazão suficiente; (b) início da curvatura do menisco à jusante; (c) menisco invadindo a região de revestimento; (d) região de revestimento totalmente perfurado o que identifica o limite de vazão mínima.	39
Figura 21: Recirculação para capilaridade de 0,05 na região à jusante do revestimento.	39
Figura 22: Principais detalhes da geometria com barra de revestimento do método por	

Mestrado em Energia

extrusão de camada única.	42
Figura 23: Variação da viscosidade em relação a taxa de cisalhamento.	45
Figura 24: Inicialização da simulação utilizando a metodologia VOF.....	50
Figura 25: Domínios líquido e gás que permitem a determinação da superfície livre pela técnica VOF.....	54
Figura 26: Forma e posição da superfície livre para diferentes espessuras (em μm): (a) 166,7; (b) 100,0; (c) 57,8; (d) 31,1; (e) 26,7; (f) 20,0.....	58
Figura 27: Domínios líquido e gás que permitem a determinação da superfície livre pela técnica VOF.....	59
Figura 28: Geometria inicial utilizada nesse trabalho.	61
Figura 29: Geometrias utilizadas para análise de <i>far field</i> na condição de entrada com (a) geometria da esquerda ampliada para 15H e (b) 20H.	61
Figura 30: Geometrias utilizadas para análise de <i>far field</i> na condição de saída com (a) geometria da direita ampliada para 15H, (b) 20H e (c) 25H.....	62
Figura 31: Vetores velocidade das geometrias utilizadas para análise de <i>far field</i> na condição de entrada com (a) geometria inicial, (b) 15H e (c) 20H.	63
Figura 32: Vetores velocidade das geometrias utilizadas para análise de <i>far field</i> na condição de saída com (a) geometria inicial, (b) 15H, (c) 20H e (d) 25H.	64
Figura 33: Captura do limite de vazão mínima que ocorre entre (a) as vazões de 57 mg/s e passo de tempo CFL, (b) 45 mg/s e passo de tempo CFL e (c) 57 mg/s e passo de tempo BKZ, correspondentes ao Caso 3 com $Ca = 1,505$	67
Figura 34: Captura da vazão mínima de 57 mg/s e passo de tempo CFL correspondentes ao Caso 3 em que $Ca = 1,505$ utilizando os parâmetros de simulação de Moraes <i>et al.</i> (2016).	69
Figura 35: Vetores velocidade para o caso 6 com de vazões de 5 mg/s (a), 1 mg/s (b), 0,17 mg/s (c) e (d) 0,15 mg/s.	70
Figura 36: Vetores velocidade para uma capilaridade de 0,05, velocidade de substrato de 1,5 mm/s e vazão de entrada de 17 mg/s.	71
Figura 37: Número de capilaridade em função da abertura entre a barra e a espessura do filme.....	71
Figura 38: Função viscosidade descrita pelo modelo de Carreau para $\eta_0 = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\eta_\infty = 0,0007 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\lambda = 0,9 \text{ s}$ e diversos valores do expoente n na equação (12).....	73
Figura 39: Forma e posição da superfície livre para diferentes espessuras (em μm): (a) 166,7; (b) 100,0; (c) 57,8; (d) 28,9; (e) 20,0. Para o caso 8.....	75

Mestrado em Energia

Figura 40: Captura do limite de vazão mínima que ocorre entre as vazões de 55 mg/s (a) e 25 mg/s (b) correspondentes ao caso 8 em que $Ca = 1,505$	76
Figura 41: Captura do limite de vazão mínima que ocorre entre as vazões de (a) 57 mg/s para fluido-newtoniano e (b) 55 mg/s para fluido não newtoniano ambos com $Ca = 1,505$	77
Figura 42: Espessura dimensional, t , em função do número de capilaridade, Ca , e dos índices de Power Law, n	78
Figura 43: Cisalhamento máximo no menisco de (a) 26,059 1/s; (b) 25,996 1/s; (c) 25,992 1/s para uma velocidade de substrato de 1,5 mm/s e uma vazão de entrada de 57 mg/s.	79
Figura 44: Concentração de partículas com as velocidades do substrato em (a) caso 1; (b) caso 3 e (c) caso 5 para fração de partículas na entrada de 5%, cenário 3. ...	82
Figura 45: Concentração de partículas com as velocidades do substrato em (a) caso 1; (b) caso 3 e (c) caso 5 para fração de partículas na entrada de 10%, cenário 3. .	83
Figura 46: Concentração de partículas para uma velocidade do substrato de 1,5 mm/s, fração de partículas na entrada de 5% e vazão de fluido de (a) 95 mg/s e (b) 57 mg/s.	83

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros utilizados para realização do teste de malha.	42
Tabela 2: Parâmetros numéricos utilizados.....	50
Tabela 3: Especificação dos passos de tempo adotados nos três cenários utilizados.	52
Tabela 4: Parâmetros utilizados para criação das malhas grosseira, média e refinada.	57
Tabela 5: Resultados obtidos para $V_w = 1,5$ mm/s, com escoamento de fluido newtoniano.....	57
Tabela 6: Relação da malha com o tempo de simulação e a espessura mínima.....	59
Tabela 7: Relação entre a geometria horizontal esquerda com o tempo de simulação e o número de elementos da malha.	62
Tabela 8: Relação da geometria horizontal esquerda com o tempo de simulação e a espessura mínima.	64
Tabela 9: Especificação dos casos gerais estudados no cenário 1.	65
Tabela 10: Especificação dos números de Courant (Co) do cenário 1.	66
Tabela 11: Resultados da vazão da vazão crítica para o cenário 1.	66
Tabela 12: Parâmetros numéricos modificados.	68
Tabela 13: Casos estudados neste trabalho, outros parâmetros de Carreau são mantidos constantes.	72
Tabela 14: Especificação dos números de Courant (Co) do cenário 2.	73
Tabela 15: Resultados obtidos com as condições do caso 8.....	74
Tabela 16: Resultados da vazão crítica em relação ao índice de <i>power law</i> , n , para o cenário 2.....	74
Tabela 17: Especificação dos casos gerais estudados no cenário 3.	81
Tabela 18: Resultados da vazão crítica em relação a fração de partículas, ϕ , para o cenário 3.....	81

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: CONCEITOS BÁSICOS.....	13
1 Introdução.....	13
1.1 Motivação.....	16
1.2 Objetivos.....	17
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Ciência e tecnologia do revestimento: uma visão geral.....	20
2.2 Revestimento por extrusão	31
CAPÍTULO 3: METODOLOGIA	41
3.1 Definição da geometria e dados do problema	41
3.2 Formulação matemática	43
3.3 Abordagem numérica	47
3.4 Teste de independência de malha	56
3.5 Teste de independência das fronteiras	60
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	65
4.1 Fluido newtoniano (cenário 1)	65
4.2 Fluido não-newtoniano (cenário 2).....	72
4.3 Fluido newtoniano com partículas (cenário 3)	79
CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5.1 Sugestões de trabalhos futuros.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
APÊNDICE A: ARTIGO PUBLICADO NA ETE (JAN-JUN, 2015).....	97
APÊNDICE B: ARTIGO PUBLICADO NA CIENG (JUL-DEZ, 2015)...	98
APÊNDICE C: ARTIGO PUBLICADO NA ESPACIOS NO V38 N1	99
APÊNDICE D: FUNÇÃO DEFINIDA PELO USUÁRIO PARA O PERFIL DE VELOCIDADE DESCRITO NA ENTRADA DO ESCOAMENTO..	100
APÊNDICE E: GESTÃO FINANCEIRA.....	103

CAPÍTULO 1: CONCEITOS BÁSICOS

1 Introdução

O constante desenvolvimento do setor industrial mundial e o aumento na utilização de equipamentos elétricos numa diversidade de atividades humanas tem feito com que a demanda por energia elétrica aumente, inclusive de forma exponencial nas últimas décadas (MIRANDA, 2003). Este aumento não tem sido acompanhado pela taxa de investimentos no setor de geração de energia elétrica, o que tem causado muitos problemas no sistema energético de alguns países (MIRANDA, 2003).

Com esse aumento da demanda energética mundial, a instabilidade do preço do petróleo devido a interesses econômicos e geopolíticos, e uma crescente preocupação com a contaminação atmosférica, tem imposto a necessidade de um aumento na utilização de fontes renováveis para a produção de energia, a fim de manter o balanço energético (STEM, 2007).

Atualmente, a matriz energética mundial está composta, em sua grande maioria por combustíveis fósseis – carvão, petróleo e gás natural são responsáveis por praticamente 70% da geração mundial de energia (EPE, 2016).

Sabe-se que 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 esta mudança.

Uma das principais tendências mundiais de energia de baixo carbono é a energia solar, por ser uma fonte facilmente disponível e usada desde os tempos remotos para aquecimento e iluminação de casas e edifícios, para geração de eletricidade, cozimento de alimentos, aquecimento de água, refrigeração solar (XU, HUANG e DU, 2011), secagem de materiais diversos, além de uma variedade de usos comerciais e industriais, como o uso em soldagem de alumínio (KARALIS, PANTELIS e PAPAZOGLU, 2005), ou na indústria do petróleo para facilitar seu transporte em tubulações mediante o aquecimento (HE, 2014).

Apresentam-se, então, como principais vantagens da energia fotovoltaica: a) possibilidade de fornecimento de eletricidade em localidades isoladas, b) custos

menos suscetíveis às flutuações como o do petróleo, c) passível de ser modulada e ter suas potencialidades ampliadas de acordo com as necessidades e d) coincidência da produção com os picos de consumo de energia em locais com utilização significativa de ar-condicionado, entre outras (STEM, 2007).

É uma fonte silenciosa, modular, necessita de pouca manutenção, possui prazos de instalação e operação muito pequenos, pode ser facilmente integrada às construções para gerar eletricidade localmente sem a necessidade de linhas de transmissão que provocam perdas e alto impacto ambiental (IMHOFF, 2007).

No entanto, atualmente a produção de energia fotovoltaica não se apresenta competitiva com a energia elétrica convencional. Em parte, este panorama se deve ao fato de que os prejuízos ambientais inerentes à geração de energia convencional não são contabilizados no orçamento das mesmas (STEM, 2007).

Historicamente, a energia fotovoltaica é aplicada em certos nichos e aplicações especiais, como comunidades isoladas, equipamentos eletrônicos (calculadoras, relógios, comunicação), uso em satélites, sensoriamento remoto, proteção catódica de dutos e iluminação de placas em rodovias. O problema desses nichos é que eles são usualmente pequenos e para uma produção em larga escala de painéis fotovoltaicos é necessário baixar os custos (GOLDEMBERG e LUCON, 2008).

Essa perspectiva vem sendo alterada, pois alguns países como Alemanha, Japão, Espanha, dentre outros, incentivam o uso da energia solar fotovoltaica com financiamentos e subsídios. Estes subsídios favoreceram um acentuado aumento nas pesquisas em energia solar nas áreas de Física, Engenharia e Arquitetura (DE ANDRADE, 2008).

O uso da energia solar fotovoltaica tem destaque nos países europeus (Figura 1), os quais tem contribuído com 58% da instalação global até 2013. Isto é resultado dos incentivos a esta tecnologia proporcionados pelos governos, mesmo que, em comparação com outros países, como o Brasil, o potencial do recurso não seja alto.

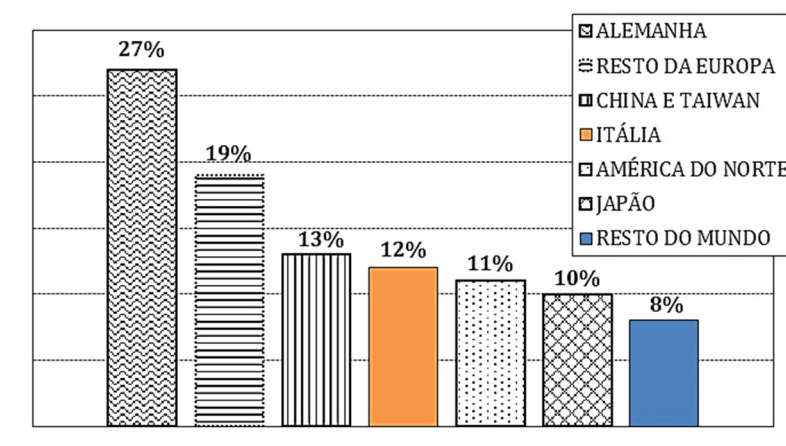
De acordo com Razykov *et al.* (2011) a produção de células fotovoltaicas (PV – *photovoltaic solar cells*) tem aumentado consideravelmente com taxas de 30% a 40% a partir do ano 2000 (Figura 2), sendo os principais mercados USA, Japão e a União Europeia.

Documentos internacionais reportam para o ano de 2050 50% da geração de energia no mundo virão de fontes renováveis. Dessa demanda, 25% serão supridos pela energia solar fotovoltaica. Populações do fim do século dependerão em até 90%

das renováveis, dos quais 70% será de fotovoltaica (CGEE, 2010).

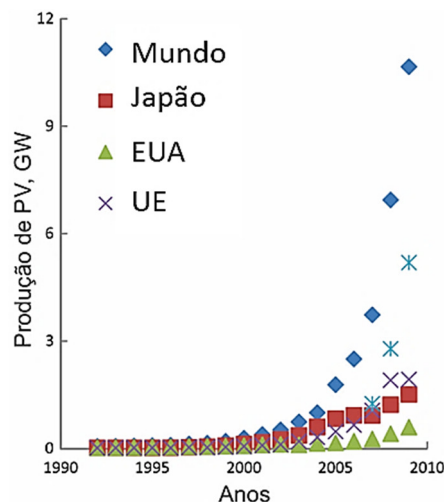
No Brasil em 2015, segundo a EPE (2016) a participação de energias renováveis na Matriz Energética Brasileira foi de 41,2%, com 16,9% proveniente da biomassa de cana, 11,3% de energia hidráulica, 8,7% de lenha e carvão vegetal, e 4,7% de lixo e outras renováveis. A repartição desse último mostra que a lixo tem uma participação de 2,6%, o biodiesel de 1,0%, a energia eólica de 0,6%, outras biomassas de 0,4%, e a energia solar representa 0,0%. Desse modo, fica evidente a defasagem do Brasil em relação ao restante do mundo quanto a utilização de energia solar.

Figura 1: Instalação fotovoltaica global acumulada até 2013.



Fonte: ISE (2015). (modificado).

Figura 2: Aumento da demanda de células solares.



Fonte: RAZYKOV *et al.* (2011). (modificado).

1.1 Motivação

Os altos custos dos módulos fotovoltaicos sempre foram o principal problema desta tecnologia. Até a década de 70 sua utilização era restrita a aplicações bem específicas, como as espaciais, onde altos orçamentos eram empregados. Devido à crise gerada pelo petróleo nesse período, a energia fotovoltaica começou a receber importantes investimentos tanto do setor público, por meio de programas de incentivos governamentais, como de empresas privadas que vislumbraram na energia solar fotovoltaica uma boa oportunidade para investimentos (MARTINS, 2000).

Como consequência das políticas de investimentos na pesquisa e desenvolvimento dos painéis fotovoltaicos, a sua produção mundial e a demanda cresceram consideravelmente, de modo que os custos da geração fotovoltaica diminuíram significativamente. Com esta redução, os sistemas fotovoltaicos se tornaram mais acessíveis e começaram a ser utilizados principalmente em lugares remotos e de clima inóspito (SEGUEL, 2009).

No Brasil possivelmente haverá um crescimento do uso da energia elétrica solar fotovoltaica, seguida da eólica, podendo vir a predominar sobre a energia hidroelétrica, a qual atualmente representa elevada parcela da matriz energética, uma vez que o país é rico em recursos naturais e possui recursos humanos disponíveis para atuar na geração de energia solar fotovoltaica. Apesar de notáveis esforços em algumas fontes renováveis de energia, são poucos os resultados que promovam a inserção da energia fotovoltaica na matriz elétrica nacional (CGEE, 2010).

O Estado brasileiro encontra-se em fase de posicionamento sobre a definição de políticas públicas de incentivo ou regulamentação que promovam (ou que permitam de forma clara e eficaz) a inserção dessa fonte de energia nas redes concessionárias de eletrificação rural e urbana. Esse fato dificulta o desenvolvimento da energia fotovoltaica em maior escala e ressalta a importância da aplicação de mecanismos regulatórios para o seu fomento empresarial e incentivo à inovação tecnológica, gerando milhares de empregos de alto valor agregado (CGEE, 2010).

Outros empecilhos para a adoção da energia fotovoltaica em grande escala são: o alto custo atual da engenharia fotovoltaica, o que muitas vezes torna seu emprego urbano inviável e o desconhecimento dos benefícios da utilização dessa fonte limpa e renovável num país de dimensões vantajosas e com índices muito

favoráveis de irradiação solar (CGEE, 2010).

Apesar das inúmeras vantagens enumeradas, que são significativas, sobretudo aquelas que dizem respeito à sustentabilidade ambiental, os sistemas fotovoltaicos ainda não são competitivos quando comparados com as fontes de energia convencionais. O custo da produção de eletricidade por sistema fotovoltaico continua a ser superior aos processos de produção tradicionais de eletricidade, tais como a partir dos combustíveis fósseis e nucleares (COSTA, 2011).

Desse modo, as pesquisas atuais na busca por fontes limpas de energia para solucionar a futura escassez de petróleo, bem como para mitigar os impactos ambientais causados pela queima de combustíveis fósseis, têm sido a principal motivação para este tipo de trabalho (FERNANDES, 2009).

Nesse contexto, a principal motivação deste trabalho é incentivar o maior uso do potencial pouco explorado no Brasil, dessa fonte energética, devido aos altos custos de produção.

1.2 Objetivos

O objetivo fundamental desse trabalho é minimizar a espessura do líquido depositado sobre um substrato em movimento do método de revestimento por extrusão. Como objetivos específicos, citam-se:

1. Compreender os conceitos teóricos da fabricação das células solares e suas análises decorrentes dos diversos métodos;
2. Realizar simulação bifásica (gás/líquido) em microescala para analisar o comportamento do fluido depositado em um substrato em movimento;
3. Verificar a influência de diversos parâmetros (vazão de alimentação, índice de *power law*, entre outros) na espessura de filme;
4. Verificar a influência das condições de contorno da geometria utilizada, ou seja, simulações de teste de independência de fronteiras;
5. Comparação entre o comportamento do escoamento de fluido newtoniano e não-newtoniano;
6. Analisar a concentração de partículas em um escoamento de fluido newtoniano.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A energia solar pode ser utilizada através de duas maneiras diferentes: uma é na forma de energia térmica, mediante coletores e receptores solares (SARDESHPANDE, CHANDAK e PILLAI, 2011); outra é a energia solar fotovoltaica (KAZMERSKI, 2006), isto é, uso de células solares, ou fotovoltaicas, fabricadas de materiais semicondutores que transformam a radiação solar em energia elétrica através do chamado efeito fotovoltaico.

Este efeito foi relatado pela primeira vez por Edmond Becquerel em 1839, que descobriu que certos materiais poderiam produzir pequenas quantidades de corrente elétrica quando expostos à luz (WILLIAMS, 1960).

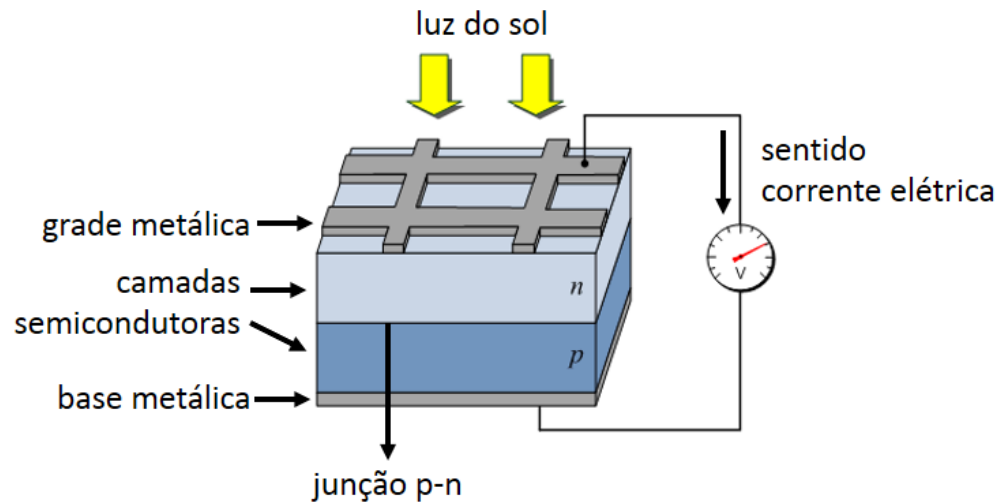
O material mais difundido para este uso é o silício, que aliás é o segundo elemento mais abundante na terra, de modo que matéria prima não é um limitante para a fabricação de células solares (KAZMERSKI, 2006).

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 contínua, que pode ser convertida em corrente alternada ou armazenada em baterias para ser utilizada posteriormente (KAZMERSKI, 2006).

O efeito fotoelétrico ocorre na junção de dois materiais semicondutores, sendo um com dopagem tipo “p” e outro com dopagem tipo “n”, como mostra a **Figura 3**. O efeito ocorre quando fótons de luz atingem a camada “n” e os elétrons dessa camada são energizados, mas não conseguem fluir para a camada “p” devido ao efeito isolante elétrico da junção “p-n”. Desse modo, tanto “n” (via grade metálica) quanto “p” (via base metálica) são ligadas externamente, onde pode se verificar uma diferença de potencial.

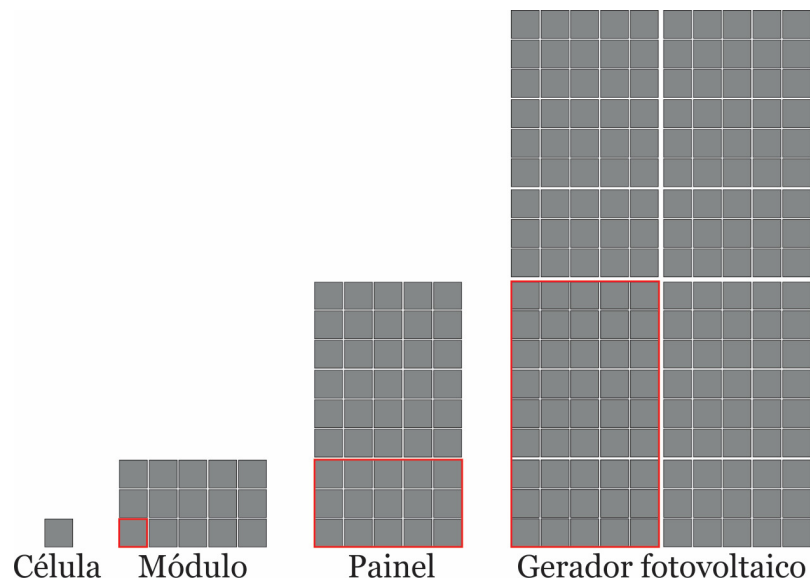
A energia fotovoltaica pode ser produzida mesmo em dias nublados ou chuvosos. Entretanto, quanto maior for a radiação solar, maior será a quantidade de eletricidade produzida. As células fotovoltaicas podem ser dispostas de diversas formas, sendo a mais utilizada a montagem módulos, painéis ou gerador fotovoltaico, como mostra a **Figura 4**. 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.

Figura 3: Esquema básico de uma célula fotovoltaica.



Fonte: LABSOLAR (2016) (modificado).

Figura 4: Esquema básico da montagem das células solares.



Fonte: UMINHO (2014) (modificado).

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; a crise

energética de 1973, dentre outros. (NEOSOLAR, 2015; PORTAL SOLAR, 2015 e 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, que foi instalado 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, WANG e CISZEK, 1999). Entretanto, o custo desta tecnologia é ainda elevado.

Células fotovoltaicas são tecnologias em geral classificadas, a depender da matéria prima utilizada e da 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 monocristalino (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.

2.1 Ciência e tecnologia do revestimento: uma visão geral

Dentre as tecnologias de fabricação já disponíveis, e as que estão em fase de pesquisa e desenvolvimento na área de células solares, pode ser destacado um grupo específico de células chamado de células fotovoltaicas de filmes finos (do inglês *thin-film cells*). Esta tecnologia, abordada neste estudo, é responsável por 10 % a 15 % da capacidade fotovoltaica instalada no mundo (RCA LABORATORIES, 2011).

Em processos de revestimento industriais, uma ou várias camadas de líquidos são depositadas sobre um substrato sólido, inicialmente chamado de filme úmido, e são, subsequentemente, secas ou curadas para formar uma película sólida que apresenta funções específicas e, ao contrário dos módulos cristalinos, os de películas finas são fabricados em um passo único. Segundo Kistler e Schweizer (1997), a espessura dessas películas de revestimento é tipicamente da ordem de 1 a 100 μm , ou mais. Essa gama de variação de espessuras é explicada de acordo com a escolha do processo de revestimento aplicado.

De acordo com Nanetti (2006), processos de revestimento são utilizados em muitas indústrias que fabricam diferentes produtos, incluindo papel de diversas qualidades e acabamentos de superfície; materiais de embalagem; material impresso, como livros, jornais, catálogos, entre outros; fotorreceptores para os processos de reprodução xerográfica; produtos de imagem como papéis fotográficos; mídias magnéticas, como fitas de áudio e vídeo, bem como CDs (discos de computador); fibras e fios; rótulos e fitas adesivas; pinturas de proteção e para decoração; revestimentos de resina fotossensível para a utilização em microeletrônica, tais como circuitos impressos; células solares e muitos outros.

Películas líquidas podem ser aplicadas em uma ou em várias camadas, de maneira simultânea ou em múltiplos passos de revestimento. Além disso, o substrato pode ser revestido sobre apenas um ou de ambos os lados, novamente produzido de maneira única ou em passos subsequentes. As soluções de revestimento são produzidas em base de água ou em solventes orgânicos. Este último, é menos atraente por razões ecológicas (KISTLER e SCHWEIZER, 1997).

Desse modo, as origens da tecnologia de revestimento estão enraizadas em diferentes segmentos da indústria associados a diferentes linhas de produtos. Além disso, o revestimento é um assunto multidisciplinar complexo, que compreende aspectos de mecânica dos fluidos, reologia, molhamento, espalhamento, adesão, matemática entre outros. Portanto, tem-se a necessidade de uma consolidação de disciplinas e uma comunicação entre os vários segmentos da indústria para seu desenvolvimento, o que começou a ocorrer com o trabalho de Landau e Levich (1941), em que foi realizada uma análise matemática sobre a tensão superficial e as forças de pressão estática na deposição de película líquida.

Para Kistler e Schweizer (1997), um grande impulso para a pesquisa começou no início do ano de 1970 sob a liderança do Professor L. E. Scriven na Universidade

de Minnesota, MN, USA. Scriven não só começou a ensinar sobre os fenômenos interfaciais, mas também iniciou um programa de pesquisa abrangente de vários métodos de revestimento, enfatizando e desenvolvendo métodos experimentais, modelos teóricos, bem como técnicas analíticas. Com a utilização de computadores mais potentes e compactos, a disponibilidade de avançados métodos matemáticos e ferramentas de medição mais refinadas, promoveu um grande desenvolvimento sobre revestimento no início do ano de 1980.

Os sistemas utilizados na produção desses filmes 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 (VITORINO, 2009).

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 (VITORINO, 2009).

Ressalta-se ainda que a tecnologia de filmes finos se diferencia 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).

Antes de descrever brevemente as principais técnicas de deposição, é importante distinguir *coating* de *printing* no contexto de células solares. Historicamente *printing* é utilizado para descrever um método através do qual um fluido é transferido para um substrato através de um carimbo. Por outro lado, *coating* é usado para descrever um processo pelo qual um fluido é transferido para um substrato essencialmente por “lançamento” (KREBS, 2009).

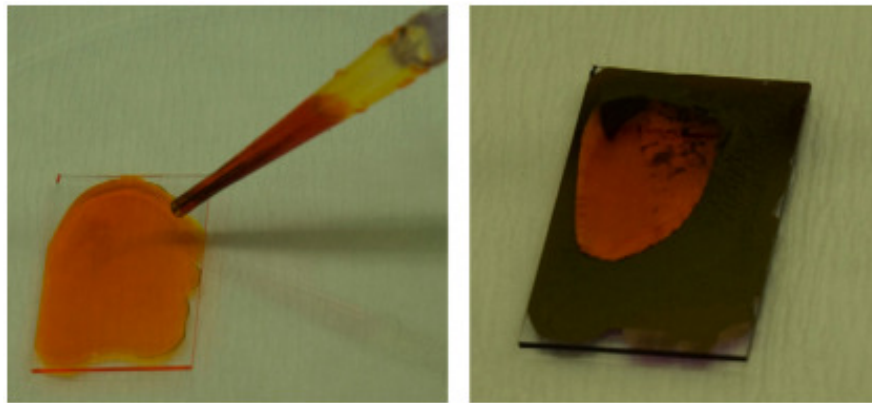
Neste contexto, diversas técnicas de deposição de filmes têm sido utilizadas. As principais, segundo Krebs (2009), são descritas nas seções a seguir.

- **Casting**

Esta é provavelmente a técnica de revestimento mais simples. O procedimento consiste em transferir uma solução sobre um substrato, seguido por secagem, como mostra a **Figura 5** (KREBS, 2009).

Embora seja possível preparar filmes de boa qualidade e preparar também filmes espessos, a técnica tem uma falta de controle sobre a espessura, podendo as bordas e o centro do substrato terem espessuras diferentes (KREBS, 2009).

Figura 5: Esquema do processo *casting*.



Fonte: KREBS (2009).

- **Spin coating**

Spin coating ou revestimento por centrifugação, em tradução livre, é um processo usado para aplicar filmes finos uniformes em substratos planos (TYONA, 2013). Esse processo, de maneira típica, envolve a deposição de uma pequena quantidade de uma resina fluida no centro do substrato e em seguida girar em alta velocidade (em geral em torno de 3000 rotações por minuto). A força centrífuga espalha resina para a borda do substrato (eventualmente ultrapassando-a) e deixando uma fina película na superfície (MITZI *et al.*, 2004). De maneira alternativa ao processo, o líquido pode ser aplicado com o substrato já em movimento, para então ser acelerado para alta velocidade (KREBS, 2009), até atingir a espessura desejada.

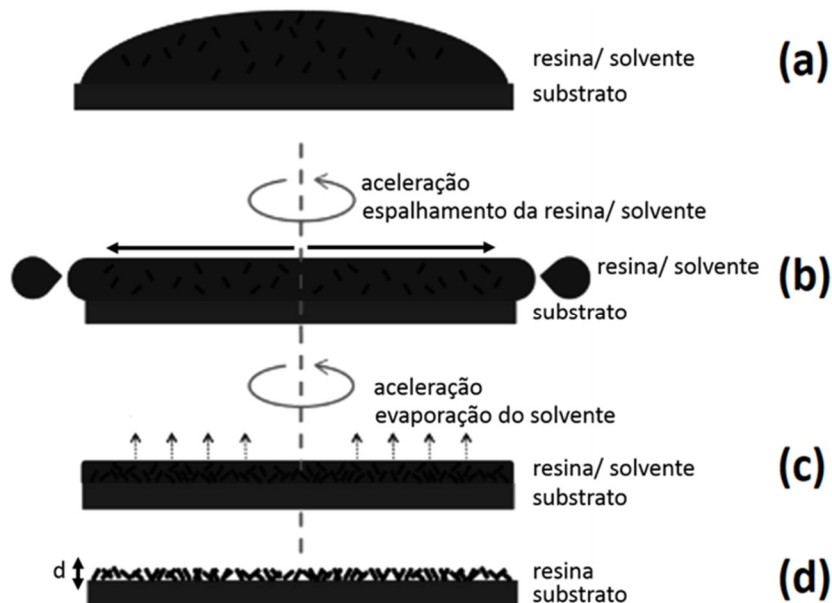
Outra característica que influencia a espessura é a razão entre a resina e o solvente. Assim, quanto maior a velocidade angular e a quantidade de solvente, mais

fino será o filme (TYONA, 2013).

Desse modo, a espessura final e outras propriedades irão depender da natureza da resina (viscosidade, velocidade de secagem, porcentagem de sólidos, tensão superficial, entre outros) e os parâmetros escolhidos para o processo de centrifugação. Fatores como a velocidade final de rotação, de aceleração e a exaustão de vapores contribuem para a definição das propriedades dos filmes revestidos. A máquina utilizada nesse processo é chamada de revestidor de rotação, em tradução livre de *spin coater*, ou simplesmente *spinner* (MITZI *et al.*, 2004). Sendo amplamente utilizado em micro fabricação, obtendo-se películas com espessuras inferiores a 10 nm (HANAOR *et al.* 2011).

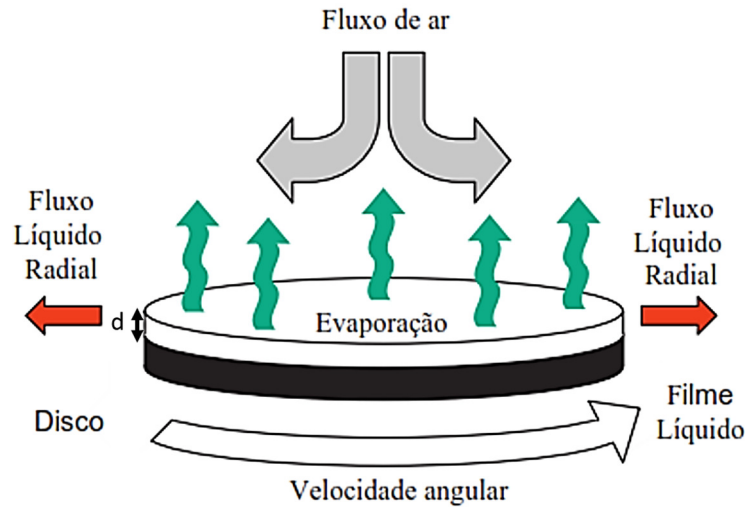
Existem quatro fases distintas no processo de *spin coating*: (a) distribuição, (b) aceleração do substrato, (c) rotação do substrato a uma velocidade constante e as forças viscosas dominam o comportamento da redução da espessura do fluido, (d) rotação do substrato a uma velocidade constante e a evaporação do solvente domina o comportamento da redução da espessura do fluido (TYONA, 2013). O processo pode ser visto na **Figura 6** (em corte) e de maneira isométrica na **Figura 7**.

Figura 6: Etapas do processo *spin-coating*.



Fonte: TYONA (2013) (modificado).

Figura 7: Esquema do processo *spin-coating*.



Fonte: KREBS (2009) (modificado).

A espessura da película, d , nesse método pode ser expressa pela relação empírica, mostrada na equação (1) (KREBS, 2009).

$$d = k\omega^\alpha \quad (1)$$

em que ω é a velocidade angular; k e α são constantes empíricas relacionadas com as propriedades físicas do solvente, soluto e substrato. Em geral, o valor de α está em torno de 0,5 e a constante k contém diversos parâmetros, como a viscosidade inicial da solução. Uma revisão sobre o tópico pode ser encontrada em Norrman, Ghanbarli-Siahkali e Larsen (2005).

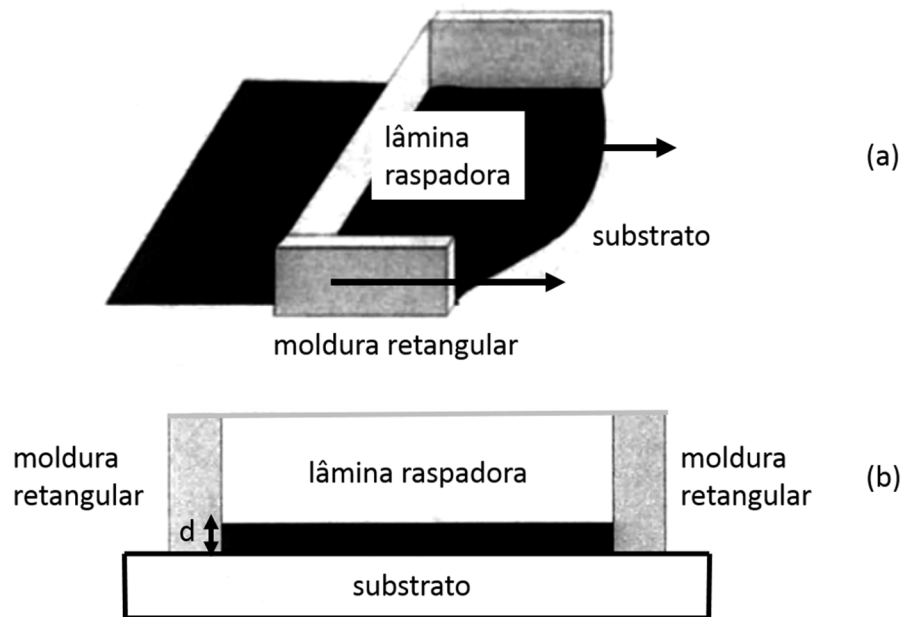
- **Doctor blade**

Doctor blade ou lâmina raspadora, em tradução livre, também conhecido como *tape casting* (moldagem por fita em tradução livre). Existem duas formas mais difundidas para aplicação do filme, uma é através de uma lâmina raspadora utilizando uma moldura retangular e outra através de um aplicador em espiral. Em ambos os métodos a espessura criada fica em torno de 10 μm (BERNI, MENNIG e SCHMIDT, 2004).

A primeira forma, lâmina raspadora utilizando uma moldura retangular, consiste

em colocar uma lâmina afiada a uma distância fixa da superfície do substrato que será revestido. A solução de revestimento é então colocada em frente da lâmina, que é movida linearmente ao longo do substrato, deixando assim uma película fina depois da lâmina (KREBS, 2009), como pode ser visto na **Figura 8** (a). A espessura da camada usando o método *doctor blade* é ajustada através da folga entre a lâmina e o substrato, como ilustrado na **Figura 8** (b).

Figura 8: Esquema do processo *doctor blade*, em que (a) vista isométrica e (b) vista lateral.



Fonte: BERNI, MENNIG e SCHMIDT (2004) (modificado).

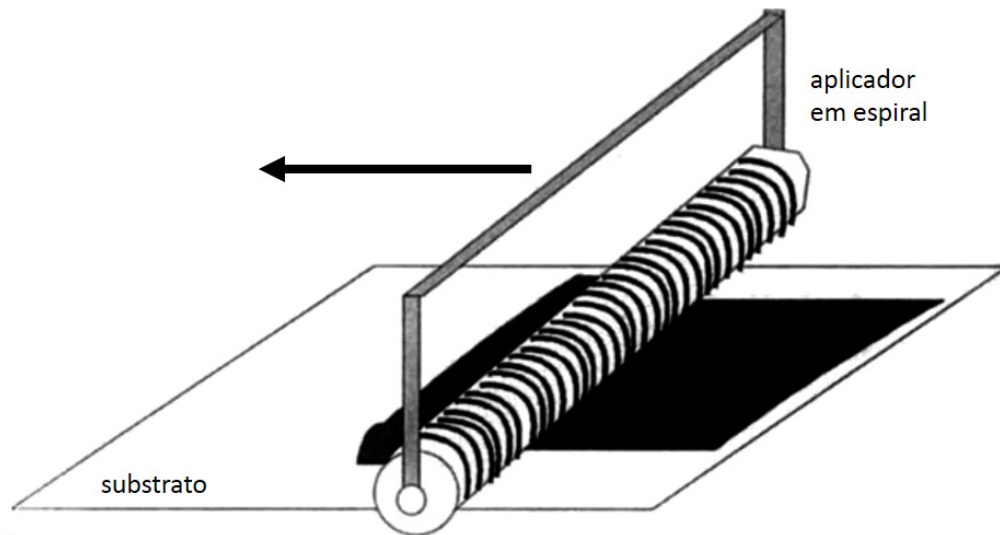
A versão utilizando um aplicador em espiral é utilizada, principalmente para superfícies com irregularidades, onde o aplicador em espiral é pressionado contra o substrato e assim é movido de maneira linear ao longo de tal substrato, carregando a solução. Esse princípio é demonstrado na **Figura 9**. A espessura é definida modificando a geometria e o tamanho da abertura dos espirais do aplicador.

A espessura da película final seca, d , nesse método pode ser expressa pela relação empírica, mostrada na equação (2) (KREBS, 2009).

$$d = \frac{1}{2} \left(h \frac{c}{\rho} \right) \quad (2)$$

em que h é a distância entre a lâmina e o substrato; c é a concentração de material sólido na tinta em g. cm^{-3} e ρ é a massa específica do material presente no filme depois de seco medido em g. cm^{-3} .

Figura 9: Esquema do processo *doctor blade* (aplicador em espiral).



Fonte: BERNI, MENNIG e SCHMIDT (2004) (modificado).

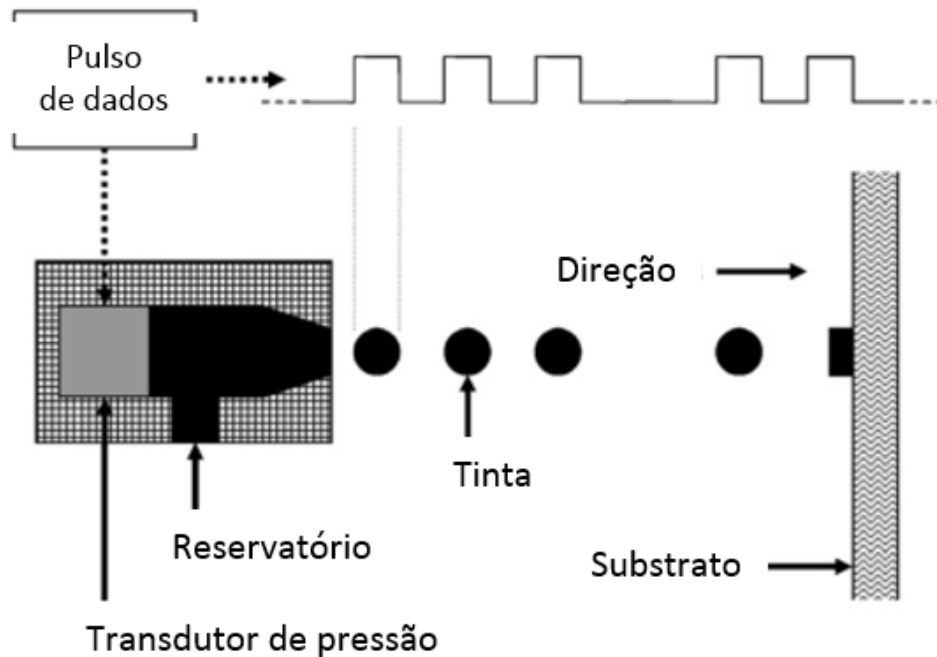
- ***Ink-jet printing***

Ink-jet printing ou impressão a jato de tinta, em tradução livre, é um método com duas categorias distintas de tecnologias utilizadas, com e sem contato de distribuição entre a cabeça de impressão e o substrato (ROSE, 2000).

O procedimento tem um funcionamento similar ao de uma impressora jato de tinta doméstica. É uma cabeça de impressão com centenas de orifícios que despejam milhares de gotículas de tinta por segundo, comandados por um programa computacional que determina quantas gotas e onde deverão ser lançadas essas gotículas para um substrato sólido, deixando assim a velocidade de deposição lenta em relação aos outros processos (KREBS, 2009).

Um esquema desse procedimento pode ser visualizado na **Figura 10**. A espessura mínima desse processo fica em torno de 140 nm (OFFERMANS, SCHLEUNIGER e NISATO, 2010). O método é empregado apenas quando as áreas a serem preenchidas são da ordem de 75 μm (AEGERTER, 2004).

Figura 10: Esquema do processo *ink jet printing*.



Fonte: KREBS (2009) (modificado).

A espessura da película final seca, d , neste método, pode ser expressa pela relação empírica mostrada na equação (3) (KREBS, 2009).

$$d = N_d V_d \frac{c}{\rho} \quad (3)$$

em que N_d é o número de gotículas depositadas por área em cm^2 ; V_d é o volume das gotículas depositadas em cm^3 .

- **Screen printing**

Screen printing ou impressão em tela, em tradução livre, é um processo parecido ao da serigrafia, no qual a tinta é vazada através de uma moldura e é geralmente seguido por um processo de secagem, podendo ser aplicado a substratos planos ou cilíndricos (SAUER *et al.*, 2004).

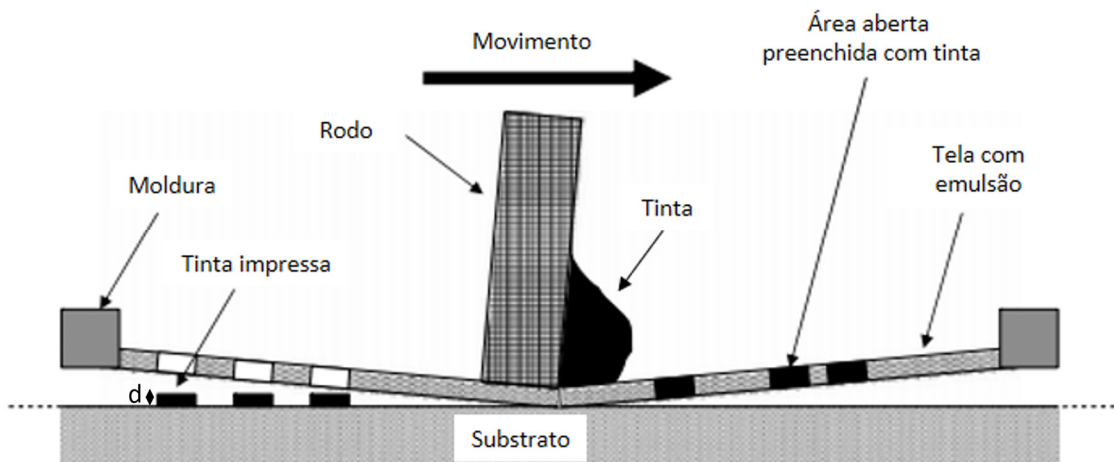
Dependendo do material de substrato, geralmente para vidros, uma densificação em altas temperaturas também pode ser necessário (SAUER *et al.*, 2004).

A tela é constituída por uma armação feita geralmente de alumínio e de uma teia feita, em geral, de seda, nylon, poliéster ou de aço inoxidável, e contém contagens entre 10 e 450 *mesh* por polegada. Telas com altas contagens de *mesh* e diâmetro de fio pequeno são apropriadas para a impressão de estruturas finas, por exemplo em substratos de vidro (SAUER *et al.*, 2004).

O processo de impressão consiste em espalhar o líquido sobre a tela, de modo que as aberturas da tela fiquem cheias com a tinta. Neste momento o substrato não está em contato com a tela. Durante o curso da impressão, as áreas abertas preenchidas com o líquido entram em contato com o substrato, enquanto o rodo (devido à pressão) pressiona o escoamento através das aberturas da teia e transfere para o substrato (KREBS, 2009).

Esse processo é mostrado na **Figura 11** de maneira esquematizada e a espessura mínima obtida fica entre 5 – 20 μm (IDC-ONLINE, 2016).

Figura 11: Esquema do processo *screen printing*.



Fonte: KREBS (2009) (modificado).

A espessura da película final seca, d , neste método, pode ser expressa pela relação empírica mostrada na equação (4) (KREBS, 2009).

$$d = V_{tela} k_p \frac{c}{\rho} \quad (4)$$

em que V_{tela} é o volume da tela, isto é, o volume entre os fios da tela e a espessura

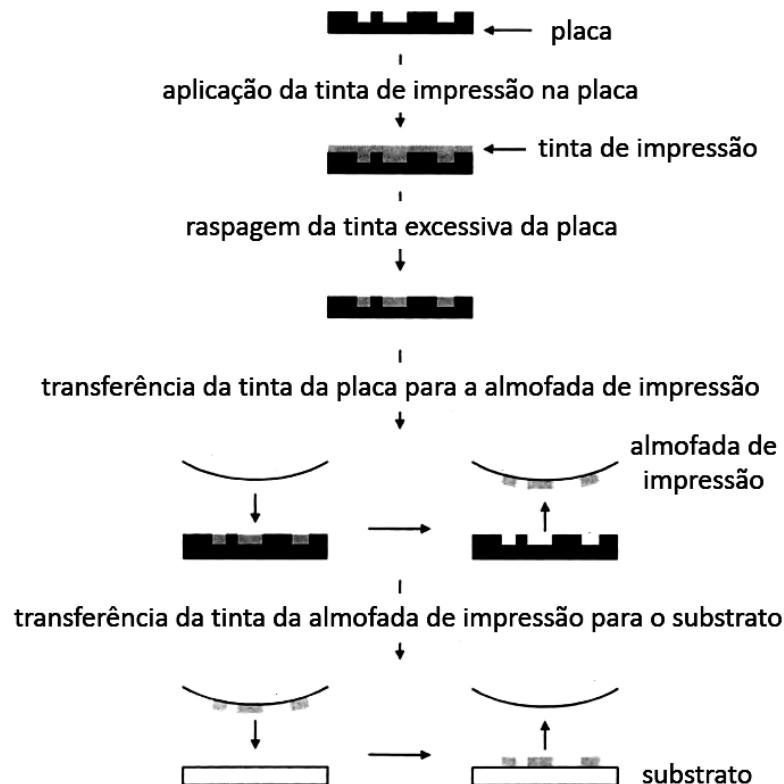
da tinta em $\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2}$; k_p é a razão de material depositado.

- **Pad printing**

Pad printing ou almofada de impressão, em tradução livre, é utilizada para os casos em que a superfície do substrato apresenta ondulações, ou apresente concavidade tanto côncava quanto convexa. A técnica emprega uma almofada de impressão (semelhante a um carimbo de borracha) feita de silicone (ou de material similar) para transferir a tinta para o substrato (KREBS, 2009).

A **Figura 12** mostra esse método, em que primeiro a placa tem a forma da imagem desejada que se quer formar; então é preenchida pela tinta e tem o excesso removido. A tinta deixada na placa, ou seja, a imagem, é transferida para a almofada de impressão e, por fim, impressa no substrato (PIETSCH e MENNIG, 2004). A espessura mínima obtida fica em torno de $25 \mu\text{m}$ (EPSVT, 2016).

Figura 12: Esquema do processo *pad printing*.



Fonte: PIETSCH e MENNIG (2004) (modificado).

A espessura da película final seca, d , neste método, pode ser expressa pela

relação empírica mostrada na equação (5) (KREBS, 2009).

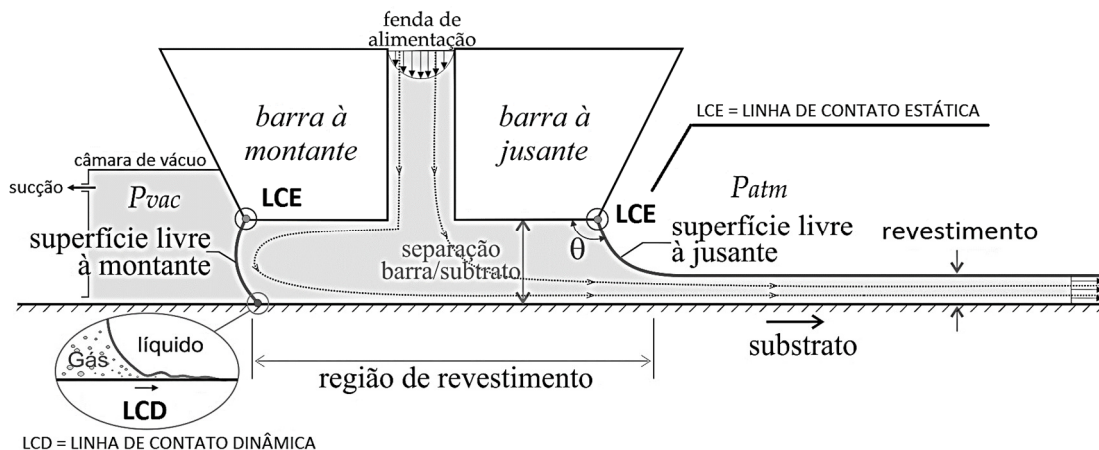
$$d = V_g k_p \frac{c}{\rho} \quad (5)$$

em que V_g é o volume da imagem presente na placa em $\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2}$.

2.2 Revestimento por extrusão

Dentre os diferentes métodos mencionados para revestir um substrato em movimento, um dos mais eficientes e amplamente utilizado é o método de revestimento por extrusão, do inglês *slot coating*. Nesse método, o líquido de revestimento é forçado através de uma fenda de alimentação para ser depositado sobre um substrato em movimento, conforme ilustrado na **Figura 13** (vista lateral).

Figura 13: Vista lateral de uma configuração típica do processo de revestimento por extrusão de camada única.



Fonte: GARUZZI e ROMERO (2015a) (modificado).

A **Figura 13** apresenta as principais características do método de revestimento por extrusão de camada única. O líquido é bombeado até a barra de revestimento por uma bomba de deslocamento positivo (para melhor controle da vazão). Após ser distribuído lateralmente em toda a largura do substrato a ser revestido, o líquido sai da câmara de distribuição e escoar pela fenda de alimentação (ROMERO, 2003).

As superfícies da barra de revestimento 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, conforme ilustrado na **Figura 13**. Esta é a região de aplicação do líquido; é limitada pelas superfícies sólidas da barra e do substrato e pelas interfaces à montante e à jusante (ROMERO, 2003).

Os meniscos à montante e à jusante entram em contato com os lábios da barra nas linhas de contato estáticas (LCE). Quando o líquido encontra o substrato em movimento forma-se a chamada linha de contato dinâmica (LCD) ou linha de molhamento. Macroscopicamente a interface líquido/gás e a parede sólida formam um ângulo denominado de ângulo aparente de contato dinâmico. Na LCD, o líquido é continuamente arrastado e levado na direção à jusante como consequência do fluxo contínuo de quantidade de movimento transferido pelo substrato. Localmente a partícula de líquido sofre uma brusca mudança de velocidade. A descrição física do processo de molhamento ainda não é bem compreendida (ROMERO, 2003).

O escoamento na região de revestimento pode tornar-se instável para elevadas velocidades ou baixas vazões do líquido, e defeitos no revestimento podem surgir nestes casos. Para estabilizar o escoamento é comum a utilização de uma caixa com vedação adequada na superfície à montante conectado a uma bomba de vácuo. O objetivo desta configuração é criar uma pressão subatmosférica na interface à montante. Este gradiente de pressão contrabalança as forças viscosas e capilares que atuam no escoamento e contribui para estabilizar o escoamento. (ROMERO, 2003).

Segundo Durst e Wagner (1997), a espessura da película não pode ser escolhida arbitrariamente, porque, para todos os processos de revestimento, existem parâmetros para um funcionamento em condições estáveis. Fora desses limites ocorrem defeitos de revestimento.

Nesse método a espessura da camada de líquido depositada só depende da vazão de alimentação. No entanto, sua 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, oscilações na bomba de alimentação do líquido e na bomba de vácuo, dentre outros. Ou seja, as propriedades do líquido, as condições de operação e a geometria do sistema (COHEN

e GUTTOF, 1992).

Estas características resultam em uma janela de operação que pode ser apresentada utilizando os parâmetros adimensionais como o número de capilaridade (C_a) definido por $C_a = \mu V / \sigma$, que relaciona as forças viscosas com as forças de capilaridade, em que μ representa a viscosidade do fluido, V a velocidade do substrato e σ a tensão superficial entre o líquido e o gás, e a espessura de filme adimensional (h) definido por $h = H/t$, com H sendo a separação barra/substrato e t a espessura mínima. Esta 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 14**.

O limite de operação mais importante no processo de revestimento por extrusão é conhecido como limite de vazão mínima (*low-flow limit*), é a transição de um revestimento contínuo de líquido para um revestimento com listras alternadas de partes revestidas e partes não revestidas. Este limite corresponde à menor espessura que pode ser revestida a uma determinada velocidade do substrato ou a maior velocidade do processo para uma determinada espessura (ROMERO, 2003).

Figura 14: Janela de operação típica do processo de revestimento por extrusão.

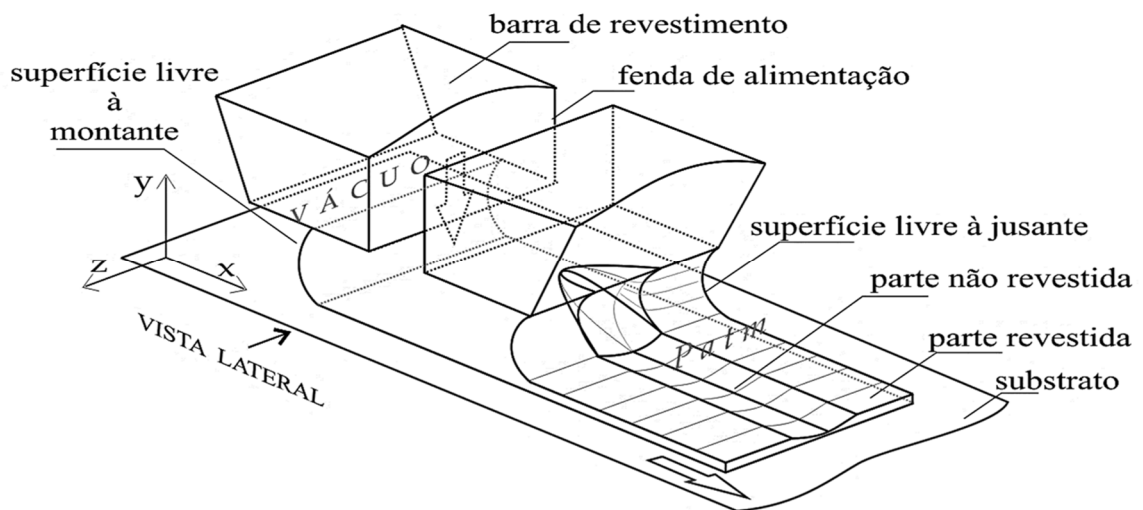


Fonte: GARUZZI e ROMERO (2015a) (modificado).

Para um Ca fixo 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.

Nestas condições existe um desperdício do material de revestimento, sendo necessário a diminuição da espessura do filme, o qual é obtido com a diminuição da vazão de alimentação. Entretanto, se a vazão é muito baixa, esta 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, **Figura 15**, deste fenômeno que é tridimensional e altamente complexo.

Figura 15: Vista tridimensional de uma configuração típica do processo de revestimento por extrusão de camada única.

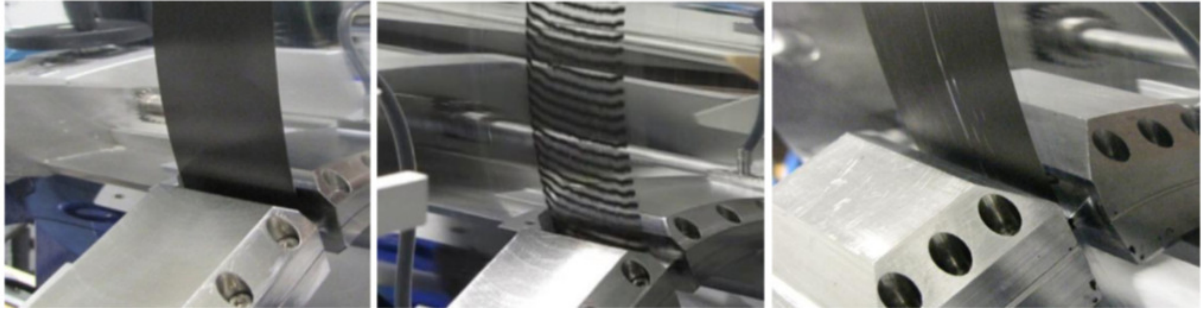


Fonte: GARUZZI e ROMERO (2015a) (modificado).

Este tipo de defeito é denominado de limite de vazão mínima (do inglês *low-flow limit*) e para condições simplificadas é descrito matematicamente como modelo de viscocapilaridade (RUSCHAK, 1976; HIGGINS e SCRIVEN, 1980; KISTLER e SCRIVEN, 1983), representado pela linha contínua na **Figura 14**. Este modelo será melhor descrito com mais detalhes no decorrer do trabalho.

O limite de vazão mínima ocorre no menisco à 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 à montante da fenda de alimentação do líquido. Esta condição é altamente instável e uma mínima redução adicional da vazão resulta em um defeito no substrato. Exemplos de defeitos indesejados e que comprometem a qualidade final do produto são observados na **Figura 16**.

Figura 16: Substrato revestido homogêneo (esquerda), com defeito tipo barramento ou *barring* (centro) e com defeito tipo listras ou *stripes* (direita).



Fonte: SCHMITT *et al.* (2013).

Ruschak (1976) analisou as condições de deposição, quando as forças capilares são dominantes. Higgins e Scriven (1980) estenderam o trabalho incluindo forças viscosas e capilares, determinando parâmetros que influenciam as superfícies livres. Este é o chamado modelo de viscocapilaridade.

O mecanismo de falha que determina o limite de vazão mínima pode ser explicado pelo modelo de viscocapilaridade proposto por Higgins e Scriven (1980). Para uma dada velocidade do substrato, a mínima espessura de filme é determinada pelo máximo gradiente de pressão adverso que pode ser criado na região da superfície livre à montante. A pressão sob o filme depositado é igual à atmosférica. Logo, o maior gradiente adverso (máximo gradiente de pressão positivo) ocorre quando a pressão sob o menisco à jusante for a menor possível (subatmosférica). Como o decréscimo da pressão através de uma superfície livre curva é inversamente proporcional ao raio de curvatura da superfície, esta condição ocorre quando o menisco está na configuração de raio de curvatura mínimo (ROMERO, 2003).

O revestimento tanto à jusante quanto à montante são influenciados pela geometria da fenda de deposição. Desse modo, se a separação barra/substrato é pequena em comparação com o comprimento da região de revestimento, o fluxo é unidimensional, tanto a influência da entrada como das condições de contorno pode ser negligenciada (DURST e WAGNER, 1997).

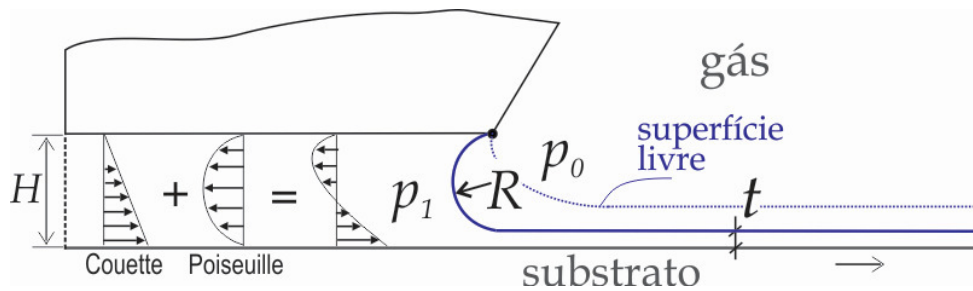
Landau e Levich (1942) demonstraram que para baixos números de capilaridade ($Ca < 1$) a espessura de filme no revestimento tipo *dip coating* é proporcional a $Ca^{3/2}$. Esta ideia foi estendida por Ruschak (1976), sendo aplicada para o revestimento por extrusão, propondo que no menisco à jusante se cumpre

$$p_0 - p_1 = 1,34Ca^{3/2} \frac{\sigma}{t} \quad (6)$$

com p_0 e p_1 sendo pressões representadas de acordo com a **Figura 17**, e σ a tensão superficial entre os fluidos.

O escoamento entre as placas paralelas é formado pelas contribuições de Couette e de Poiseuille (**Figura 17**), ou seja, o fluxo à montante tem um escoamento do tipo Poiseuille, imposto pela diferença de pressão, juntamente com um escoamento do tipo Couette, causado pelo movimento relativo do substrato, enquanto na região de jusante o escoamento é apenas do tipo Couette.

Figura 17: Vista lateral da região à montante da barra com a notação utilizada no modelo de viscocapilaridade.



Fonte: GARUZZI e ROMERO (2015b).

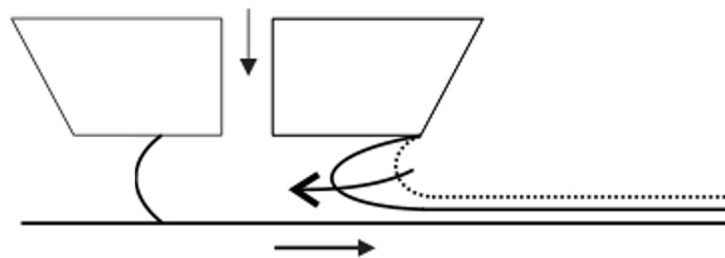
Para velocidade do substrato e separação barra/substrato constantes, a contribuição de Couette é constante. Na medida que a vazão diminui, o gradiente de pressão adverso e, portanto, a contribuição de Poiseuille, aumenta. A espessura mínima de filme está relacionada com a máxima diferença de pressão no menisco.

Considerando as pressões p_0 e p_1 , a relação $p_0 - p_1 = \frac{\sigma}{R}$ é máxima desde que o raio $R = \frac{H - t_{min}}{2}$ do menisco (assumido como cilíndrico) seja mínimo. Nesta condição, a espessura de filme depositado é também mínima, t_{min} . Das expressões apresentadas, e do número de capilaridade definido anteriormente obtém-se a relação (CARVALHO e KHESHGI, 2000):

$$C_a = \frac{1,82}{\left(\frac{H}{t_{min}} - 1\right)^{3/2}} \quad (7)$$

Esta fórmula indica que um aumento na velocidade de produção implica que a mínima espessura de filme será mais grossa. Desse modo, para uma determinada velocidade do substrato, se a vazão de alimentação for tal que a espessura do filme depositado é menor que a espessura mínima t_{min} determinada pela equação (7), o menisco a jusante invadirá o revestimento, como mostra a **Figura 18**. Essa equação pode ser rearranjada na forma $t_{min}/H = 1/\left(1 + 1,49C_a^{-2/3}\right)$, com t_{min}/H sendo a espessura adimensional, h .

Figura 18: Menisco invadindo a região de revestimento.

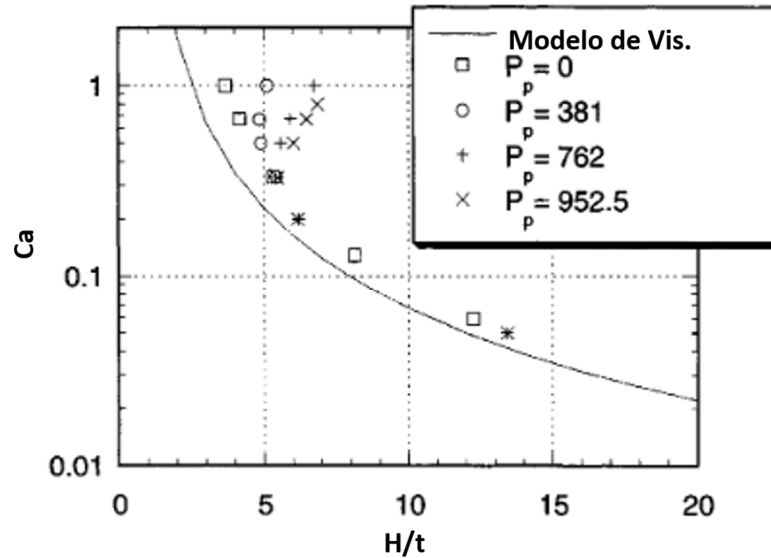


Fonte: ROMERO (2003).

Após o trabalho de Higgins e Scriven (1980) diversas publicações sobre o assunto foram elaboradas. Lee, Liu e Liu (1992) trataram do tema, mas ao não utilizarem vácuo nos seus experimentos, os resultados não puderam ser considerados representativos. Carvalho e Kheshgi (2000), mediante teoria e experimentos, apresentaram a resposta para números de capilaridade elevados, propondo a ampliação da janela de operação devido aos efeitos de inércia, como pode ser visto na **Figura 19**, com a linha contínua a modelo de viscocapilaridade, e P_p sendo o número de propriedade definido por $P_p = \text{Número de Reynolds}/\text{Capilaridade}$. Mostrando que para baixos números de capilaridade os efeitos de inercia não são importantes, uma vez que ela espessura segue o modelo de viscocapilaridade, em que a redução da capilaridade causa um aumento na espessura adimensional. Mas para números de capilaridade altos ($C_a > 0,3$) o efeito da inercia é importante, pois, a espessura adimensional aumenta com o aumento da capilaridade, sendo esperado o

efeito oposto.

Figura 19: Modelo de inercia para espessura mínima.



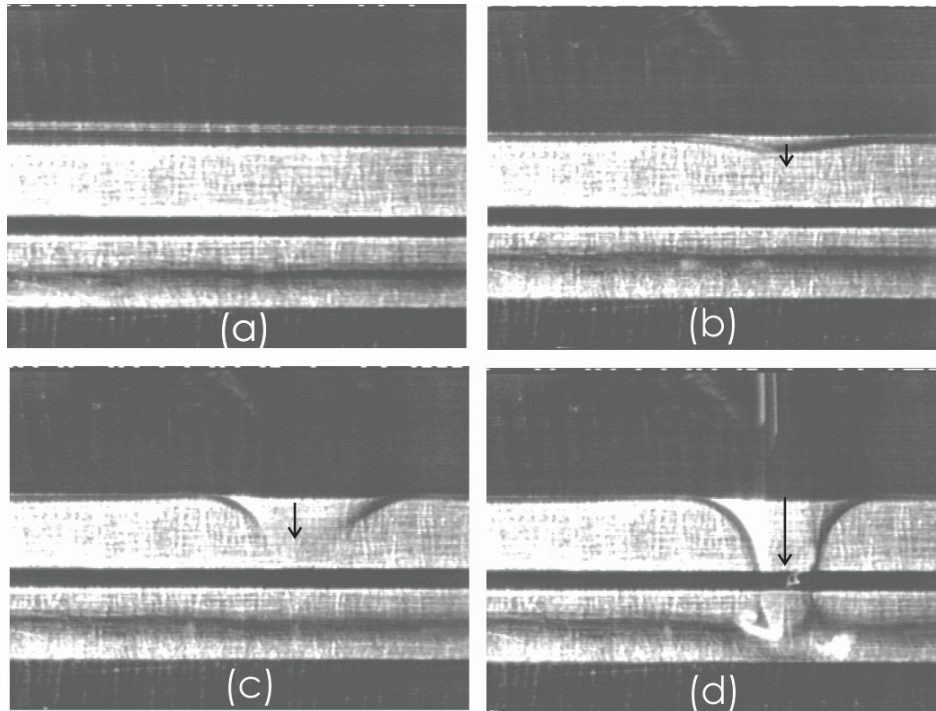
Fonte: CARVALHO e KHESHGI (2000) (modificado).

Um exemplo de visualização de fluxo foi realizado por Durst *et al.* (1988) que monitoraram o revestimento em escala aumentada e em vista lateral com uma câmera de vídeo. Outro exemplo foi o procedimento adotado por Sartor (1990) para camada única e camada dupla de deposição utilizado por Cohen, Suszynski e Scriven (1992), onde foi utilizado corantes e bolhas de hidrogênio. Romero *et al.* (2004) observaram experimentalmente a ocorrência do limite de vazão mínima para fluidos Newtonianos e soluções poliméricas diluídas, apresentando os registros do processo de quebra do menisco à jusante, conforme detalhe da **Figura 20**.

Sartor (1990) apresentou um extenso trabalho experimental e teórico referente ao processo de revestimento por extrusão de camada única. Na parte experimental, as primeiras visualizações do escoamento para diferentes configurações da barra de revestimento foram feitas mostrando o efeito de cada uma na janela de operação. Segundo esse estudo, zonas de recirculação aparecem quando a espessura de filme é menor que a terça parte do espaçamento entre a barra e o substrato.

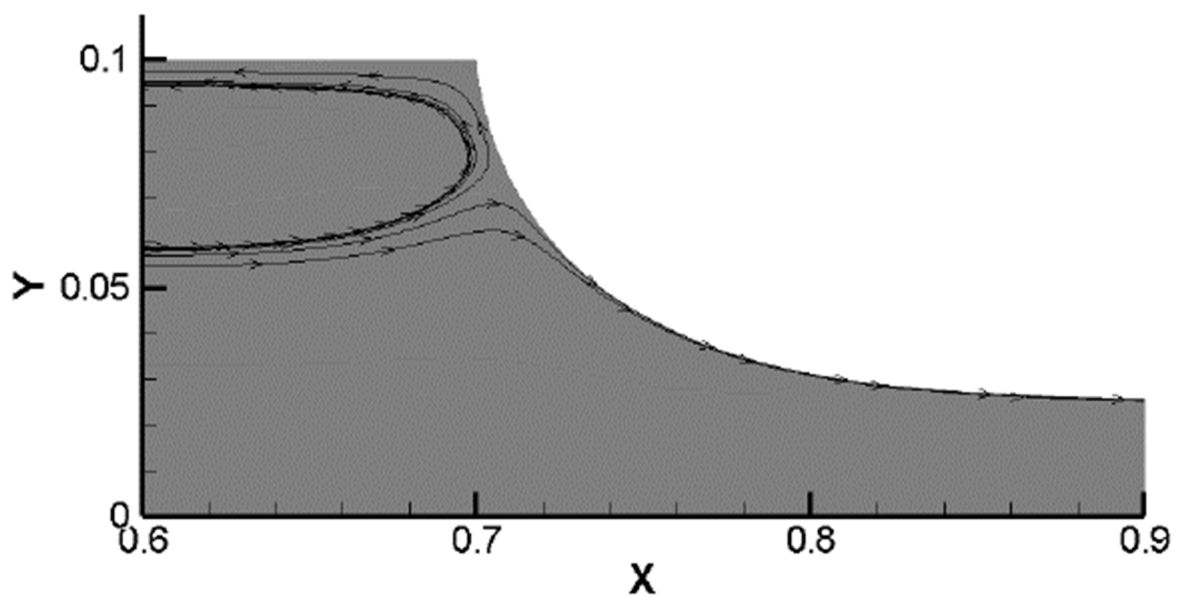
Segundo Nam e Carvalho (2010), o aparecimento desses vórtices acontece para uma combinação de parâmetros com número de capilaridade na ordem de 0,25 ou menor. Araujo (2014), mostrou essas recirculações através dos vetores velocidade para uma capilaridade de 0,05, como mostra a **Figura 21**.

Figura 20: Visualização do limite de vazão mínima detalhado. (a) revestimento livre de defeitos com vazão suficiente; (b) início da curvatura do menisco à jusante; (c) menisco invadindo a região de revestimento; (d) região de revestimento totalmente perfurado o que identifica o limite de vazão mínima.



Fonte: ROMERO *et al.* (2004).

Figura 21: Recirculação para capilaridade de 0,05 na região à jusante do revestimento.



Fonte: ARAUJO (2014) (modificado).

De acordo com Romero (2003), para manter um processo de revestimento estável, ou seja, livre de imperfeições, interações das forças de inércia, viscosidade e capilaridade que atuam sobre o revestimento devem ser adequadamente controladas. Vários parâmetros que determinam essa qualidade são listados abaixo.

Propriedades do fluido de revestimento: viscosidade, μ , para um fluido de revestimento com comportamento newtoniano. Mas a maioria dos líquidos usados em processos de revestimento industriais são soluções poliméricas ou dispersões que possuem comportamento não-newtoniano, devendo assim analisar as propriedades reológicas desse revestimento (ROMERO, 2003). Outras propriedades importantes são a tensão superficial, σ , e a massa específica, ρ , do fluido.

Parâmetros geométricos: de acordo com Durst e Wagner (1997) parâmetros geométricos são variáveis de projeto da matriz de revestimento, que define a forma, as dimensões, a inclinação e a posição da fenda de alimentação.

Parâmetros operacionais de funcionamento: são parâmetros operacionais a espessura da película úmida, t , dada em função da velocidade do substrato, V_w , a vazão de alimentação, Q , e a separação barra/substrato, H . Os números adimensionais de relevância para o processo são o número de Reynolds, Re , o número de capilaridade, Ca , e a espessura do filme adimensional, $h = H/t$ (KISTLER e SCHWEIZER, 1997).

CAPÍTULO 3: METODOLOGIA

A abordagem metodológica desse trabalho consiste em definir a geometria para o escoamento entre placas paralelas para os cenários de fluido newtoniano, não-newtoniano e newtoniano com partículas de uma região à montante que será utilizada para o estudo de revestimento por extrusão. Também serão definidas as equações governantes de conservação de quantidade de movimento e continuidade e do modelo de Carreau para fluido não-newtoniano, que serão utilizadas na abordagem numérica do *Volume Of Fluid* (VOF) para escoamento com fluido newtoniano e fluido não-newtoniano e do *Discrete Phase Model* (DPM) para fluido newtoniano com partículas que serão aplicadas através do programa computacional para modelagem de escoamento de fluidos ANSYS® Fluent® versão 14.5. Por fim foi realizado um teste de independência de malha utilizando uma malha grosseira com 4750 elementos, uma malha média com 9962 elementos e uma malha refinada com 13525 elementos para verificar se a qual a quantidade de elementos é adequada, e um teste de independência de geometria com ampliação da geometria inicial para analisar se as fronteiras do sistema influenciam nos resultados encontrados.

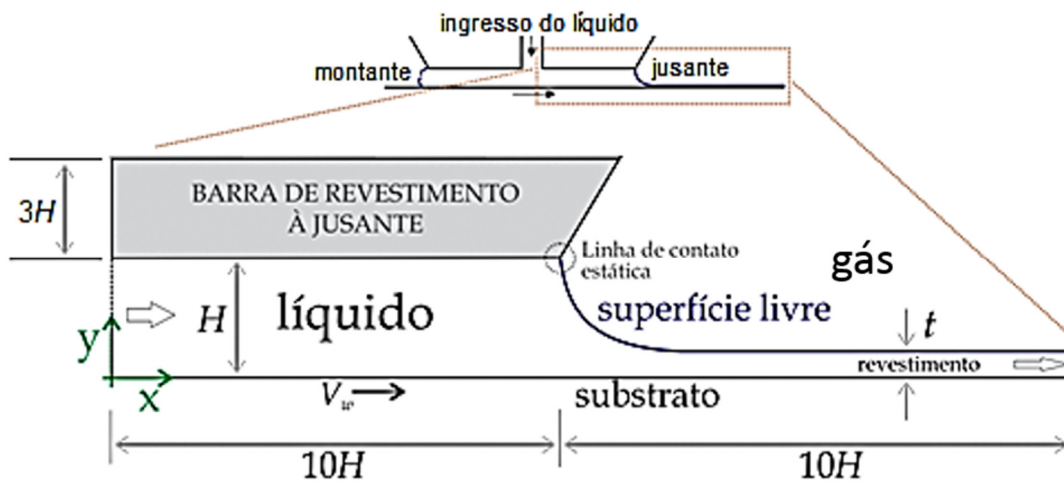
3.1 Definição da geometria e dados do problema

O domínio de interesse é a parte que contém a superfície livre à jusante, conforme detalha a **Figura 22**, e é selecionada porque apresenta uma superfície livre e uma linha de contato estática. Desse modo a geometria adotada é mais simples pois contém menos variáveis para serem calculadas.

A separação barra/substrato utilizada neste trabalho é fixada em $H = 100 \mu\text{m}$ esse valor foi adotado com base nos trabalhos de Romero (2003), Romero *et al.* (2004) e Romero e Carvalho (2008). Para a tensão superficial, σ , em 10^{-6} N/m , tensão superficial foi adotado um valor arbitrário pequeno, uma vez que para valores maiores não era possível realizar a abordagem numérica adotada nesse trabalho. Para o ângulo de contato parede/fluido foi fixado um valor que não influencia no escoamento em $\theta_w = 90^\circ$ (FOX e McDONALD, 2006). Os valores de massa específica, ρ , e viscosidade, μ , do gás são adotados como sendo $1,225 \text{ kg/m}^3$ e

$1,7894 \times 10^{-5}$ Pa.s, respectivamente, as propriedades do ar (FOX e McDONALD, 2006). No caso do líquido, são fixadas em $998,2 \text{ kg/m}^3$ e $1,003 \times 10^{-3}$ Pa.s, ou seja, propriedades da água (FOX e McDONALD, 2006). Sendo adotado um escoamento de fluido newtoniano. De forma resumida, todos esses parâmetros são apresentados na **Tabela 1**.

Figura 22: Principais detalhes da geometria com barra de revestimento do método por extrusão de camada única.



Fonte: GARUZZI e ROMERO (2015b).

Tabela 1: Parâmetros utilizados para realização do teste de malha.

Parâmetro	Valor utilizado	
Separação barra/substrato H , μm	100	
Tensão superficial σ , N/m	10^{-6}	
Ângulo de contato parede/fluido θ_w	90°	
Massa específica ρ , kg/m^3	Líquido	998,2
	Gás	1,225
Viscosidade μ , Pa.s	Líquido	$1,003 \times 10^{-3}$
	Gás	$1,7894 \times 10^{-5}$

Os cenários utilizados nesse trabalho são definidos como critério principal o fluido utilizado, e esses cenários são mostrados:

Cenário 1 fluido newtoniano: segundo Astarita (1979) fluidos newtonianos podem

ser caracterizados por uma única propriedade que depende da temperatura, pressão e composição. Essa propriedade é a viscosidade. Portanto, esse cenário, com menos variáveis, se torna importante para o entendimento do processo adotado nesse trabalho e que será utilizado nos cenários subsequentes.

Cenário 2 fluido não-newtoniano: segundo Romero (2003) muitos dos fluidos utilizados por diferentes indústrias no revestimento de substratos são soluções poliméricas, polímeros fundidos, ou suspensões, que apresentam comportamento não-newtoniano. O comportamento mecânico destes fluidos é estudado na reologia, ramo da ciência que lida com a deformação e o escoamento de materiais. Desse modo, esse cenário visa analisar o comportamento nesse tipo de escoamentos utilizando o modelo de Carreau (CARREAU, 1972), que descreve o comportamento da viscosidade do líquido em relação a taxa de cisalhamento.

Cenário 3 fluido newtoniano com partículas: segundo S-LECFILM (2017) células solares de filmes finos são possíveis devido a tecnologia que permite que partículas sejam depositadas e distribuídas uniformemente no substrato, ou seja, o estudo das partículas é de extrema importância para a tecnologia de células solares de filmes finos como um todo.

3.2 Formulação matemática

- **Fluido newtoniano**

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 massa específica ρ_l e viscosidade μ_l , são representados pelas equações (8) e (9), respectivamente.

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

(9)

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

em que \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 $\mathbf{D} = \frac{1}{2}[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T]$ e \mathbf{g} representa o vetor aceleração da gravidade.

- **Fluido não-newtoniano**

Os campos de velocidade e pressão da região líquida l são regidos pelas equações da continuidade e da quantidade de movimento linear, que escritos na forma tensorial para um fluido não-newtoniano de massa específica ρ_l e viscosidade $\eta(\dot{\gamma})$ são representados pelas equações (8) e (10).

$$\frac{\partial(\rho_l \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [2\eta_l(\dot{\gamma}) \mathbf{D}] + \rho_l \mathbf{g} \quad (10)$$

em que \mathbf{v} é o vetor velocidade, p é a pressão, \mathbf{g} representa o vetor aceleração da gravidade. Se diferindo da equação (9) pois na primeira o do tensor das tensões viscosas, $\boldsymbol{\tau}$, está em função da viscosidade, μ_l , enquanto na segunda equação viscosidade do líquido $\eta_l(\dot{\gamma})$ está em função da taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}$. O produto $2\eta_l(\dot{\gamma}) \mathbf{D}$ é o tensor das tensões viscosas representado por $\boldsymbol{\tau}$, isto é $\boldsymbol{\tau} = 2\eta_l(\dot{\gamma}) \mathbf{D}$, com \mathbf{D} o tensor taxa de deformação definido como:

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2}[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T] \quad (11)$$

em que $\nabla \mathbf{v}$ é o tensor gradiente de velocidade e o sobrescrito $()^T$ significa a operação transposta de uma matriz.

Como o líquido tem um comportamento não-newtoniano, a escolha para representar a dependência com a taxa de cisalhamento é o modelo de Carreau (CARREAU, 1972). Este modelo, embora simples, é bastante utilizado na literatura pela flexibilidade para ajustar diversas curvas experimentais, mostrando-se útil para

cálculos numéricos. O modelo de Carreau descreve o comportamento da viscosidade do líquido $\eta(\dot{\gamma})$ em função da taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}$, conforme demonstrado na equação (12).

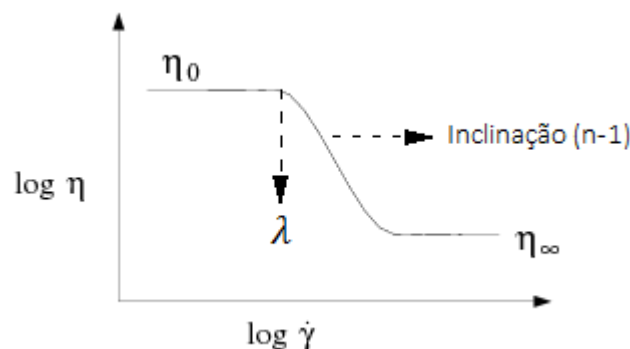
$$\eta_l(\dot{\gamma}) = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty)[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (12)$$

em que η_0 é a viscosidade a taxa de cisalhamento tendendo a zero, η_∞ é a viscosidade a taxa de cisalhamento tendendo ao infinito, λ é a constante de tempo, n é o índice de potência. ou *power law* [$n - 1$ é a inclinação da curva $(\eta - \eta_\infty)/(\eta_0 - \eta_\infty)$ versus a taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}$ (ou segundo invariante do tensor taxa de deformação) é determinada pela expressão, calculado pela equação (13)]. O gráfico dessa equação é mostrado na Figura 23.

$$\dot{\gamma} = |\mathbf{D}|^2 = \sqrt{\frac{1}{2} \mathbf{D}} \quad (13)$$

com \mathbf{D} obtido da equação (11). Os parâmetros adimensionais que tratam das forças atuantes no escoamento, que controlam o processo de solução numérica e os relacionados com a geometria, foram mostrados no tópico anterior.

Figura 23: Variação da viscosidade em relação a taxa de cisalhamento.



Fonte: Pena, Romero e Ribeiro (2014).

- **Fluido newtoniano com partículas**

Desde o trabalho sobre a migração de partículas esféricas em suspensão em fluxos não homogêneos com superfície livre por Leighton e Acrivos (1987), houve inúmeros estudos teóricos e experimentais sobre o escoamento de partículas em vários tipos de geometrias. No entanto, a maioria desses estudos tem se limitado aos fluxos dentro de fronteiras sólidas, e não houve muitos relatos sobre o fluxo em superfície livre com partículas em suspensão (MIN e KIM, 2010).

Os primeiros a relatarem a migração de partículas em um escoamento em superfície livre foram Husband *et al.* (1994). Eles realizaram estudos experimentais e descobriram que partículas grandes se movem em direção à superfície livre.

Tirumkuludu, Tripathi e Acrivos (1999) e Tirumkuludu, Mileo e Acrivos (2000) consideraram um cilindro horizontal parcialmente preenchido (para criar uma superfície livre) girando em seu eixo, mostrando que houve uma segregação das partículas para formar estruturas de banda (com alta e baixa concentração de partículas) ao longo do eixo. De maneira complementar, Timberlake e Morris (2002) mostraram que o modelo de migração de partículas pode explicar os fenômenos de instabilidade. Devido ao pouco estudo sobre o assunto, é notória a necessidade tanto experimental quanto teórica sobre a concentração de partículas e sua relação com o perfil de velocidade (MIN e KIM, 2010).

O estudo do fluido newtoniano com partículas é similar ao estudo com fluido newtoniano sem partículas para condições (CAMPANA, SILVA e CARVALHO, 2016), mas assume-se que a migração das partículas pode ser expressa pelo modelo de Phillips *et al.* (1992) para descrever um transporte de partículas em suspensão no fluxo. O modelo utilizado na condição de estado estacionário considera que as partículas são transportadas por mecanismos de convecção e difusão. A equação geral de conservação de movimento das partículas é dada por:

$$\frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \frac{\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_p}{\tau_r} + \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho_l)}{\rho_p} \quad (14)$$

sendo \mathbf{v}_p o vetor velocidade das partículas, \mathbf{v}_l o vetor velocidade do líquido, \mathbf{g} o vetor aceleração da gravidade, ρ_p a massa específica da partícula, ρ_l a massa específica

do líquido e τ_r o tempo de relaxação das partículas que é definido como

$$\tau_r = \frac{24}{Re_p C_D} \quad (15)$$

com Re_p representando o número de Reynolds da partícula, que pode ser calculado como $Re_p = \rho_l d_p (\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_p) / \mu_l$, e C_D coeficiente de arrasto (que mede a interação fluido-partícula) e é calculado através da equação

$$C_D = \frac{18\mu_l}{d_p^2 \rho_p C_C} \quad (16)$$

com d_p sendo o diâmetro da partícula, μ_l a viscosidade do líquido e C_C a correlação de Cunningham que é definida como

$$C_C = 1 + \frac{2(1-\phi)}{d_p} [1,257 + 0,4\exp(-1,1d_p/2(1-\phi))] \quad (17)$$

em que ϕ representa a fração mássica de partículas do escoamento, ou seja, a porcentagem de partículas em relação ao total de fluido.

$$\phi = \frac{\text{fluxo mássico de partículas}}{\text{fluxo mássico de fluido}} \times 100\% \quad (18)$$

3.3 Abordagem numérica

Como mostrado anteriormente, o problema a ser estudado é a modelagem de um problema de deposição de uma fina camada pelo processo de revestimento por extrusão. Para isso, será adotado o modelo VOF (*Volume Of Fluid*), pois foi desenvolvido para simular dois ou mais fluidos imiscíveis tal que a posição da interface entre eles se apresenta como informação de interesse, uma vez que o modelo é

tipicamente aplicado para simulações de líquidos em canais abertos e misturas líquido-gás ou líquido-líquido em tubulações, sendo escolhido para as simulações realizadas no presente trabalho (ANSYS, 2012).

O modelo matemático apresentado no capítulo anterior foi resolvido através do programa computacional CFD ANSYS® Fluent® versão 14.5, o qual é baseado no método de volumes finitos, utilizando o método de *solver pressure-based* com precisão simples, uma vez que neste código computacional a restrição de continuidade, ou seja, conservação de massa do campo de velocidades, é atingida com a resolução de uma equação de correção de pressão, sendo essa derivada das equações da continuidade e de movimento de forma a garantir que o campo de velocidades, corrigido pela pressão, satisfaça a continuidade (ANSYS, 2012). Sendo também os seguintes parâmetros numéricos apresentados como *default*: acoplamento pressão-velocidade SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*), discretização espacial do gradiente *Least Squares Cell Based*, discretização espacial da pressão PRESTO! (*PREssure STaggering Option*), discretização espacial da quantidade de movimento *Second Order Upwind*, discretização espacial da fração volumétrica *Geo-Reconstruct* (*Geometric Reconstruction*), e formulação transiente com precisão de primeira ordem implícita (*First Order Implicit*).

Inicialmente Santos *et al.* (2016) fez um estudo em micro escoamento sobre a influência dos parâmetros numéricos. Esse tema também foi estudado por Coelho e Romero (2016) e Morais *et al.* (2016). Baseado nesses trabalhos alguns parâmetros foram modificados em relação aos parâmetros numéricos *default*. A Tabela 2 mostra os parâmetros numéricos *default* e os de Morais *et al.* (2016) de forma resumida.

- 1. Acoplamento pressão-velocidade:** modificado de SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) que foi desenvolvido por Patankar e Spalding (1972), que usa uma relação entre velocidade e correções de pressão para reforçar a conservação das propriedades envolvidas no cálculo (ANSYS, 2012) para PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), desenvolvido por Issa (1986), o modelo consiste em gerar uma solução mais aproximada da correção da pressão e da velocidade ao empregar dois níveis de correção (correção de assimetria e correção de vizinhança), podendo manter um cálculo estável para um passo de tempo elevado. A vantagem dele em relação ao

algoritmo SIMPLE é o fato da convergência por passo de tempo ser alcançada com um número menor de iterações, apesar do tempo requerido para uma iteração ser maior;

2. **Discretização espacial do gradiente:** mantido *Least Squares Cell Based* utilizado para malhas não estruturadas, caso deste trabalho, e que é bastante preciso e menos dispendioso computacionalmente quando comparado aos outros métodos (ANDERSON e BONHUS, 1994). Esse método utiliza uma variação linear de uma variável entre duas células (ANSYS, 2012);
3. **Discretização espacial da pressão:** mantido PRESTO! (*PREssure STaggering Option*), que faz a discretização da pressão na face através de um balanço da continuidade para um volume de controle escalonado sobre essa face (PATANKAR, 1980);
4. **Discretização espacial da quantidade de movimento:** modificado de *Second Order Upwind* pois segundo Maliska (2004), quando o fluxo não está alinhado com a malha, a discretização de segunda ordem perde precisão numérica, em que o valor é obtido pela linearização dos valores de uma variável no centro das duas células vizinhas à montante da face (BARTH e JESPERSEN, 1989) para *QUICK (Quadratic Upwind Implicit Differencing Convective Kinematics)*, desenvolvido por Leonard e Mokhtari (1990) que utiliza uma interpolação polinomial em três volumes de controle da malha computacional, constituídos pelos dois nós adjacentes e um nó a montante da face.
5. **Discretização espacial da fração volumétrica:** modificado de Geo-Reconstruct (*Geometric Reconstruction*) que representa a interface entre os fluidos através de uma interpolação linear dos fluxos através das faces de cada elemento (YOUNGS, 1982) para *CICSAM (Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes)*, desenvolvido por UBBINK (1997). O esquema é adequado para os fluxos com altas razões de viscosidades entre as fases e oferece a vantagem de produzir uma interface que é quase tão nítida quanto o esquema Geo-Reconstruct.
6. **Formulação transiente:** mantida a precisão de primeira ordem implícita (*First Order Implicit*) em que as equações do problema devem ser resolvidas iterativamente em cada intervalo de tempo antes de passar para o seguinte. Para essa ordem o passo de tempo deve ser pequeno. (ANSYS, 2012).

Embora a região do gás não seja 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, desta maneira, determinar a forma e posição da superfície livre, que é o objetivo final deste trabalho. Inicialmente é definido no Fluent quais regiões estão presentes o líquido (LÍQUIDO) e em quais o gás (GÁS). Ou seja, existe uma inicialização da solução, como mostra a **Figura 24**. Esse método também foi aplicado por Garuzzi e Romero (2015a), para mais detalhes consultar o APÊNDICE A.

Figura 24: Inicialização da simulação utilizando a metodologia VOF.

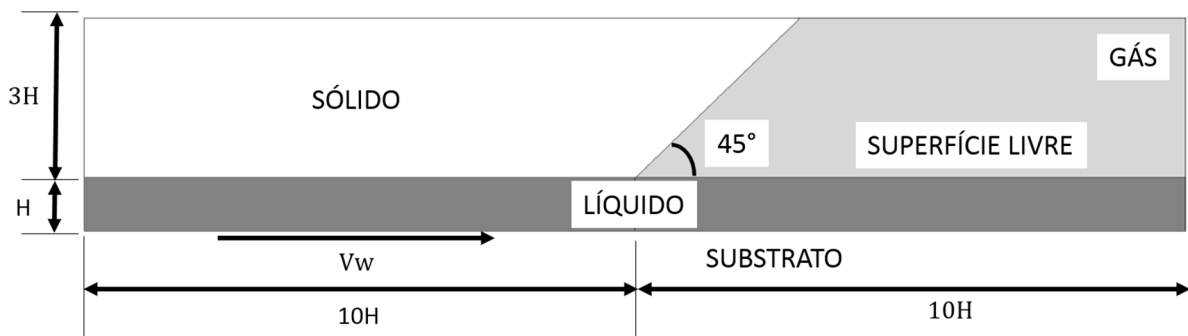


Tabela 2: Parâmetros numéricos utilizados.

Parâmetros numéricos	Default	Morais et al. (2016)
Acoplamento pressão-velocidade	SIMPLE	PISO
Discretização espacial do gradiente	<i>Least Squares Cell Based</i>	<i>Least Squares Cell Based</i>
Discretização espacial da pressão	PRESTO!	PRESTO!
Discretização espacial da quantidade de movimento	<i>Second Order Upwind</i>	QUICK
Discretização espacial da fração volumétrica	Geo-Reconstruct	CICSAM
Formulação transiente	<i>First Order Implicit</i>	<i>First Order Implicit</i>

- **Passo de tempo (todos os cenários)**

Duas condições foram utilizadas para a escolha do passo de tempo, a primeira é o número de Courant (C_o) que é um parâmetro utilizado para obter a solução convergida de problemas com uma abordagem explícita e dependentes do tempo. A restrição de passo de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL), Δt_{CFL} , é, portanto

$$\Delta t_{CFL} = \frac{C_o \Delta x}{V_w} \quad (19)$$

com Δx sendo o tamanho máximo de cada elemento da malha.

A outra condição para escolha do passo de tempo se refere a discretização explícita da tensão superficial para problemas bifásicos proposto por Brackbill, Kothe e Zemach (BKZ) (1992), Δt_{BKZ} , dada por

$$\Delta t_{BKZ} = \left(\frac{\rho_w \Delta x^3}{2\pi \sigma_{aw}} \right)^{0,5} \quad (20)$$

sendo ρ_w a massa específica da água e σ_{aw} é a tensão interfacial entre o ar e a água.

O passo de tempo atendendo a restrição imposta pelo Número de Courant (C_o), que controla a convergência da abordagem explícita. Utilizando a equação (19) e adotando o tamanho máximo de cada elemento da malha (Δx), como 6,8 μm e fixando o passo de tempo Δt_{CFL} em 0,0068 segundos, sendo utilizado para os casos 1, 2, 3, 4 e 5 do cenário 1 e todos os casos dos cenários 2 e 3. O tempo necessário de escoamento foi de 1,7 segundos, o número de passos de tempo é de 250, o número de iterações por passo de tempo de 75.

Com intuito de reduzir o passo de tempo caso 3 do cenário 1 foi adotado o passo de tempo de Δt_{BKZ} sendo calculado através da equação (20), e obtido o valor de 0,0002 segundos. O tempo necessário de escoamento foi de 1,7 segundos, o número de passos de tempo é de 8500, o número de iterações por passo de tempo de 15. Esse passo de tempo foi novamente utilizado para o caso 6 do cenário 1, mas o tempo de escoamento é de 50 segundos, o número de passos de tempo é de

250.000 e o número de iterações por passo de tempo de 15, uma vez que esse caso teve a velocidade de substrato reduzida drasticamente. Os passos de tempo adotados em cada cenário são detalhados na **Tabela 3**.

Tabela 3: Especificação dos passos de tempo adotados nos três cenários utilizados.

Cenários	Casos	Passo de tempo, s
	1, 2, 4 e 5	$\Delta t_{\text{CFL}} = 0,0068$
1	3	$\Delta t_{\text{CFL}} = 0,0068$ e $\Delta t_{\text{BKZ}} = 0,0002$
	6	$\Delta t_{\text{BKZ}} \Delta t_{\text{BKZ}} = 0,0002$
2	1 até 9	$\Delta t_{\text{CFL}} = 0,0068$
3	1 até 6	$\Delta t_{\text{CFL}} = 0,0068$

- **Volume Of Fluid (todos os cenários)**

A superfície livre, e sua influência no processo, é determinada pelo método VOF (*Volume Of Fluid*), descrito por Hirt e Nichols (1981), disponível no programa computacional comercial *FLUENT* da ANSYS Inc. O método é utilizado para descrever um fluxo bifásico gás/líquido, para isso, resolve-se uma equação para determinar a fração volumétrica da fase secundária, que para esse caso é o líquido (α_l), através de

$$\frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}) = 0 \quad (21)$$

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. Neste caso um algoritmo específico é utilizado para determinar a posição da interface no interior de cada célula;
- ✓ $\alpha_l = 1$, quando a célula está completamente preenchida pelo líquido, portanto sem gás.

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

$$\alpha_g = 1 - \alpha_l \quad (22)$$

No contexto do VOF, as equações (8) e (9) são aplicadas não apenas no domínio original do líquido (**Figura 22**). Inclui-se também o domínio do gás, conforme mostrado na **Figura 25**. Desta forma, introduzindo um termo de força volumétrica \mathbf{F}_{vol} que incorpora os efeitos de tensão superficial, as equações ficam da seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu [\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{vol} \quad (24)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [2\eta(\dot{\gamma})\mathbf{D}] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{vol} \quad (25)$$

A massa específica ρ e a viscosidade μ utilizadas nas equações (23) e (24) são apresentadas para os cenários 1 e 3, e as equações (23) e (25) para o cenário 2. Sendo a diferença entre as equações (24) e (25) apenas o termo da viscosidade, com viscosidade μ constante na primeira e na segunda é uma função da taxa de cisalhamento $\eta(\dot{\gamma})$. E são determinados em função das massas específicas, equação (26), e viscosidades das fases líquida (l) e gasosa (g) para os cenários 1 e 3, equação (27). Para o cenário 2 utiliza-se as equações (12) e (13) apresentadas anteriormente. Como o modelo de Carreau (cenário 2), para fluido não-newtonianos é aplicado apenas par líquidos o termo da viscosidade é definido como sendo $\mu_l = \eta(\dot{\gamma})$.

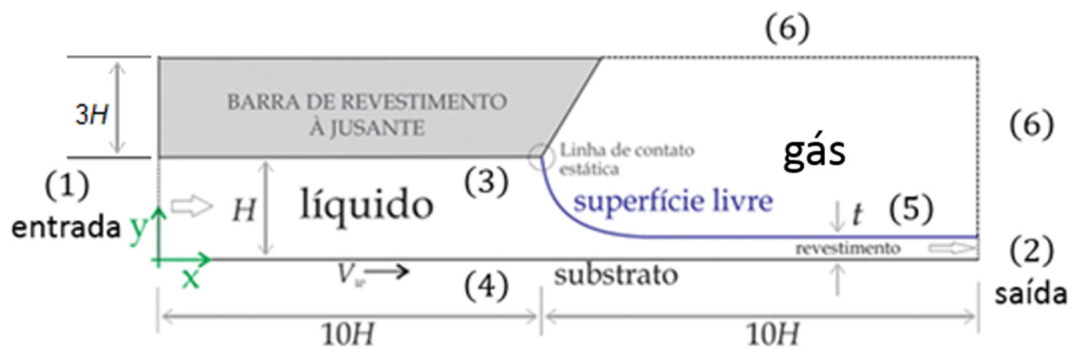
$$\rho = \alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g \quad (26)$$

$$\mu = \alpha_l \mu_l + \alpha_g \mu_g \quad (27)$$

Para tratar o termo de força volumétrica, \mathbf{F}_{vol} , o modelo *Continuum Surface Force* – CSF proposto por Brackbill, Kothe e Zemach (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 $\kappa = \nabla \cdot \vec{n}$, e o vetor normal unitário à interface \vec{n} da expressão $\vec{n} = \frac{\nabla \alpha_o}{|\nabla \alpha_o|}$.

Na abordagem VOF para tratamento da superfície livre, o domínio líquido de interesse apresentado na **Figura 22** é ampliado para os domínios líquido e gás, mostrado na **Figura 25**.

Figura 25: Domínios líquido e gás que permitem a determinação da superfície livre pela técnica VOF.



Fonte: GARUZZI e ROMERO (2015b) (modificado).

As condições de contorno aplicadas, e de salto para (5), identificadas por números e representam:

- (1) vazão de líquido Q prescrita na entrada;
- (2) pressão manométrica nula no plano de saída;
- (3) parede fixa onde as condições de não escorregamento e de impenetrabilidade $u_{\text{wall}3} = 0$ e $v_{\text{wall}3} = 0$ em $y = H$ são válidas;
- (4) parede móvel, de forma similar à condição anterior, entretanto com velocidade do substrato prescrita $u_{\text{wall}4} = V_w$ e $v_{\text{wall}4} = 0$ em $y = 0$;
- (5) na superfície livre a equação $\mathbf{F}_{\text{vol}} = \sigma_{lg} \kappa \frac{\rho \nabla \alpha_l}{\frac{1}{2}(\rho_l + \rho_g)}$ é aplicada; e
- (6) fronteiras da região do gás onde a condição de pressão manométrica nula é prescrita, o que permite entrada e/ou saída de gás.

- **Partículas (aplicado no cenário 3)**

Na simulação de um escoamento particulado pode ser utilizada uma abordagem lagrangeana, representada pelo Modelo de Fase Discreta, tradução livre de *Discrete Phase Model* (DPM). Nesta abordagem, o fluido é considerado como uma fase contínua (euleriana) ou governante, obtidas através das equações de Navier-Stokes. Enquanto as partículas são consideradas como uma fase discreta (lagrangeana) ou dispersa, cuja descrição é obtida com base na segunda lei de Newton para o movimento, através do rastreamento de uma quantidade significativa de partículas (De LAI, 2013).

Na formulação padrão do DPM a fração volumétrica da fase discreta das partículas, deve ser menor do que 10%, de modo que a influência desta fração volumétrica seja negligenciada no equacionamento da fase contínua (De LAI, 2013).

A forma geral das equações do modelo Euleriano para a fase contínua l (fluido) de acordo com ANSYS (2012) para a conservação de massa e quantidade de movimento foram apresentadas pelas equações (23) e (24).

A trajetória da fase discreta é calculada através da solução do conjunto de equações diferenciais ordinárias, p , (com base na segunda lei de Newton), equações (28) e (29). O cálculo é feito através do balanço de forças que atuam sobre a partícula em relação à própria inércia da partícula. A determinação da velocidade e posição da partícula é resolvida pela integração gradual ao longo de cada passo de tempo da fase discreta, ou seja, o cálculo da velocidade da partícula utiliza a velocidade da fase contínua previamente calculada no instante de tempo anterior (De LAI, 2013).

A integração ao longo do tempo da equação (28) fornece a velocidade da partícula para cada ponto ao longo da trajetória, dada pela equação (29), sendo o conjunto armazenado em um plano referencial lagrangeano. O conjunto de equações de movimento e de posição do modelo DPM, para a fase discreta α , é expresso, de forma geral, segundo ANSYS (2012) por

$$m_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = m_p \frac{18\mu_l C_D Re_p}{\rho_p d_p^2} (\mathbf{v}_l - \mathbf{v}_p) + m_p \frac{(\rho_p - \rho_l)}{\rho_p} \mathbf{g} \quad (28)$$

e por

$$\frac{d\mathbf{X}_p}{dt} = \mathbf{v}_p \quad (29)$$

em que m_p é a massa da fase discreta, \mathbf{v}_p é o vetor velocidade da fase discreta, ρ_p é a massa específica da fase discreta, d_p é o diâmetro da partícula, C_D é o coeficiente de arrasto da partícula, Re_p é o número de Reynolds da partícula e, \mathbf{X}_p é o vetor posição da partícula. O primeiro termo do lado direito da equação (28) representa a força de arrasto em função do número de Reynolds da partícula, Re_p ; o segundo termo agrupa a força de empuxo em conjunto com a força da gravidade e a equação (29) relaciona o vetor posição com o vetor velocidade da partícula.

Por fim, uma característica particular do modelo DPM é a forma de representação do movimento das partículas, que são consideradas como pontos de massa em movimento. A forma e volume das partículas são tratadas como abstrações, cujos detalhes do escoamento ao redor da geometria das partículas (e.g., vórtices, descolamentos, camada limite) são negligenciados (De LAI, 2013).

3.4 Teste de independência de malha

A escolha da malha computacional adequada para a solução do escoamento é de suma importância para a confiabilidade dos resultados numéricos. A precisão da solução depende do número de elementos e como estes estão distribuídos na malha. Em geral, à medida que a malha é refinada, a solução numérica na maioria das vezes se aproxima de uma solução mais exata, porém, o esforço computacional é cada vez maior. A qualidade da malha possui um papel direto na qualidade da análise tornando a etapa da sua geração mais importante e que demanda mais tempo no problema de CFD. Assim, a malha ideal deve apresentar um compromisso entre o tempo de processamento e a precisão dos resultados (FEJOLI, 2016).

Foi utilizada a ferramenta de criação de malhas *Meshing*. Foram utilizadas uma malha grosseira, uma média e uma refinada para discretizar o domínio, com objetivo de analisar a influência dessa discretização na solução. Os parâmetros utilizados para gerar os três níveis de discretização das malhas são mostrados na **Tabela 4**, em relação a geometria inicial, com $\Delta x_{\text{máx}}$ sendo o tamanho máximo de cada elemento da malha e a porcentagem da área de líquido a região de interesse no domínio.

Tabela 4: Parâmetros utilizados para criação das malhas grosseira, média e refinada.

Malha	$\Delta x_{\text{máx}}, \mu\text{m}$	Número de elementos	Porcentagem da área de líquido	Qualidade ortogonal
Grosseira	9,8	4750	42,95%	0,99872
Média	6,8	9962	44,27%	0,99888
Refinada	5,8	13525	45,24%	0,99890

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 (ANSYS, 2012), ou seja, todas as malhas têm qualidade. Foi realizada uma sequência de simulações para a malha média e o resultado da espessura, t , é apresentado na **Tabela 5**. Destacando que para as outras malhas o procedimento é similar e, portanto, não é mostrado.

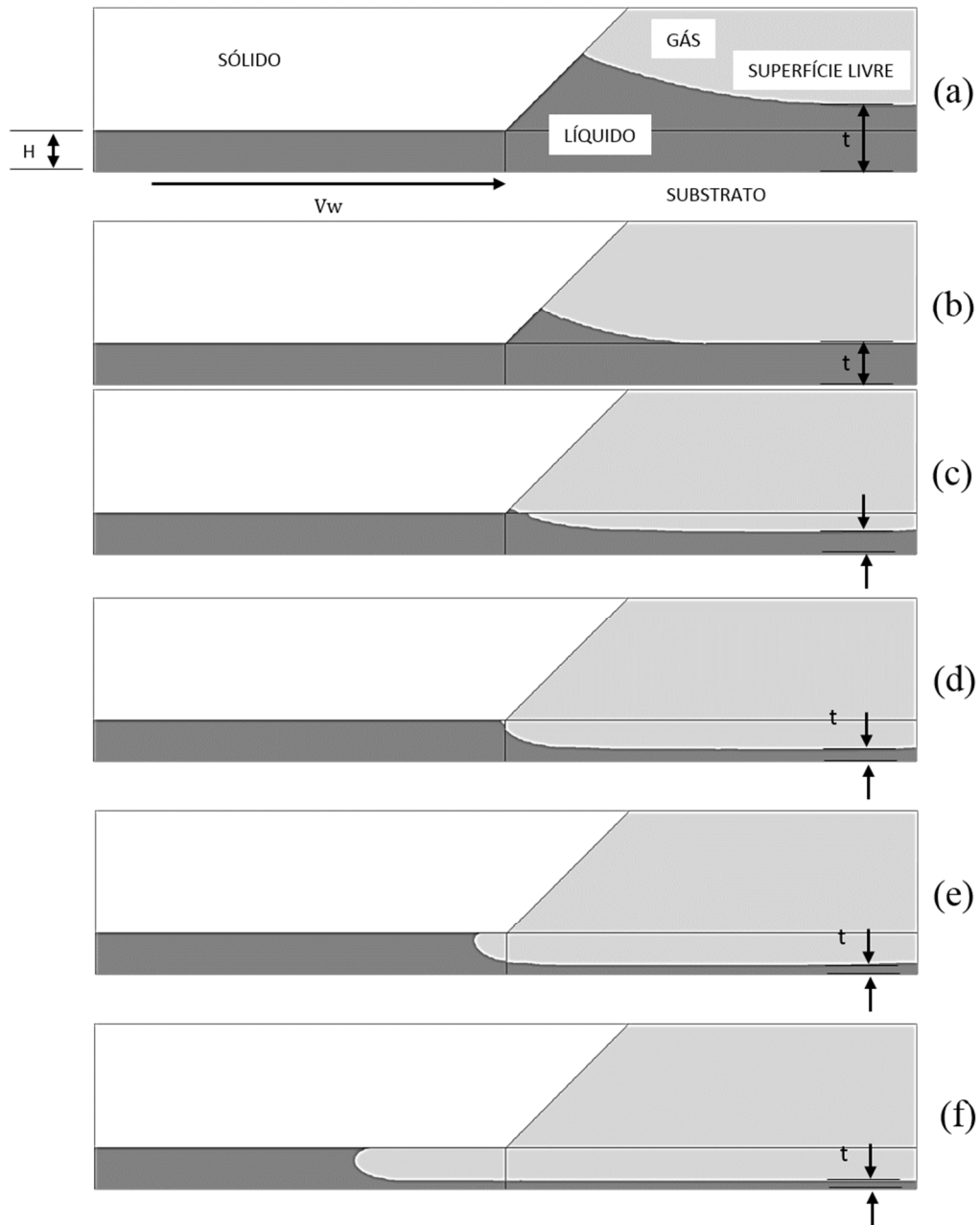
Tabela 5: Resultados obtidos para $V_w = 1,5 \text{ mm/s}$, com escoamento de fluido newtoniano.

Itens	$V_w, \text{mm/s}$	$Q, \text{mg/s}$	$t, \mu\text{m}$
a	1,5	250	166,7
b		150	100,0
c		95	57,8
d		57	31,1
e		45	26,7
f		25	20,0

Fixada a velocidade do substrato em $1,5 \text{ mm/s}$, e com as propriedades do líquido e do gás mostradas anteriormente, a vazão de alimentação de líquido Q é diminuída gradativamente a partir de 250 mg/s , de acordo com os valores mostrados na **Tabela 5**. Com isso, a espessura de filme t também diminui, ou de forma equivalente, a espessura de filme adimensional $h = H/t$ aumenta.

Na **Figura 26**, tem-se o registro desta sequência, que também foi abordada por Garuzzi e Romero (2015b), para mais detalhes consultar o APÊNDICE B. Observa-se que a curvatura da superfície livre se torna 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 resultado da curvatura acentuada do menisco, **Figura 26 (d)**. A convergência do processo de solução torna-se mais difícil.

Figura 26: Forma e posição da superfície livre para diferentes espessuras (em μm): (a) 166,7; (b) 100,0; (c) 57,8; (d) 31,1; (e) 26,7; (f) 20,0.



A espessura de filme depositado é determinada monitorando a massa específica do líquido na posição a 1,980 mm da entrada, onde o filme é estável e de espessura constante. Na **Figura 26** (a), (b) e (c), que corresponde às vazões de 250 mg/s, 150 mg/s e 95 mg/s, a região depositada apresenta defeito. Nestas condições existe um excesso de material depositado, ou seja, desperdício.

Na **Figura 26** (e) e (f), que corresponde as vazões de 45 mg/s e 25 mg/s, a região depositada também apresenta defeito, uma vez que 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. Este limite ocorre na vazão de 57 mg/s, **Figura 26** (d), onde a espessura obtida é de 31,1 μm , ou na forma adimensional, $h_{\text{min}} = 3,2154$.

Para a malha grosseira o limite de vazão mínima ocorre em 65 mg/s, onde a espessura obtida é de 35,6 μm , ou na forma adimensional, $h_{\text{min}} = 2,8090$. Já para a malha refinada o limite de vazão mínima ocorre em 57 mg/s, onde a espessura obtida é de 31,1 μm , ou na forma adimensional, $h_{\text{min}} = 3,2154$, ou seja, valores iguais aos encontrados para a malha média. O gráfico comparando estes valores, assim como cada grau de refinamento, são mostrados na **Figura 27**. Os tempos de simulação são apresentados na **Tabela 6**, em que a malha grosseira é 47% mais rápida e a refinada 47% mais lenta em comparação a malha média.

Figura 27: Domínios líquido e gás que permitem a determinação da superfície livre pela técnica VOF.

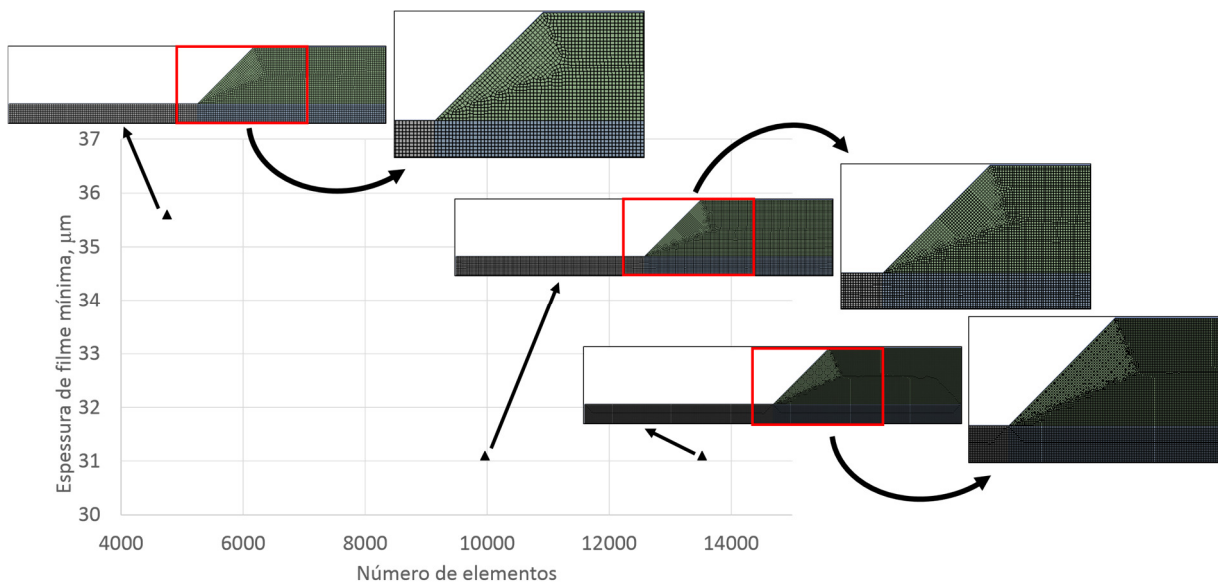


Tabela 6: Relação da malha com o tempo de simulação e a espessura mínima.

Malha	Tempo de simulação, min	Espessura mínima, μm
Grosseira	8	35,6
Média	17	31,1
Refinada	25	31,1

Como a malha média apresenta o mesmo resultado que a malha mais refinada,

esta é utilizada no decorrer do trabalho. Dos 9.962 elementos da malha 2, 4.410 pertencem ao domínio líquido e 5.552 ao domínio gás, significando que o esforço computacional tem utilidade prática em 44,27% do domínio.

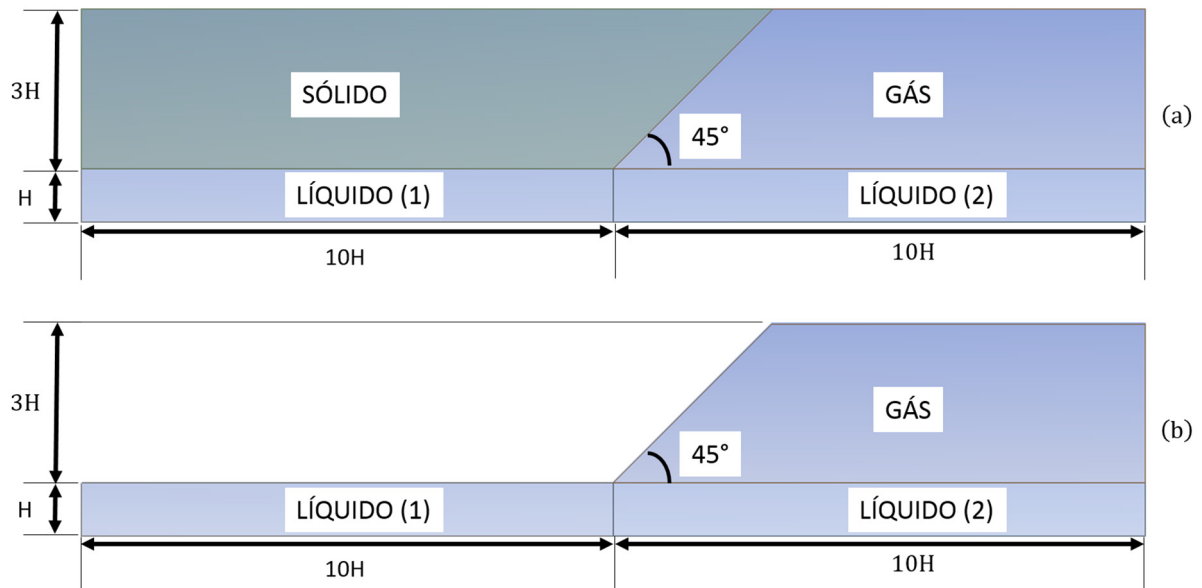
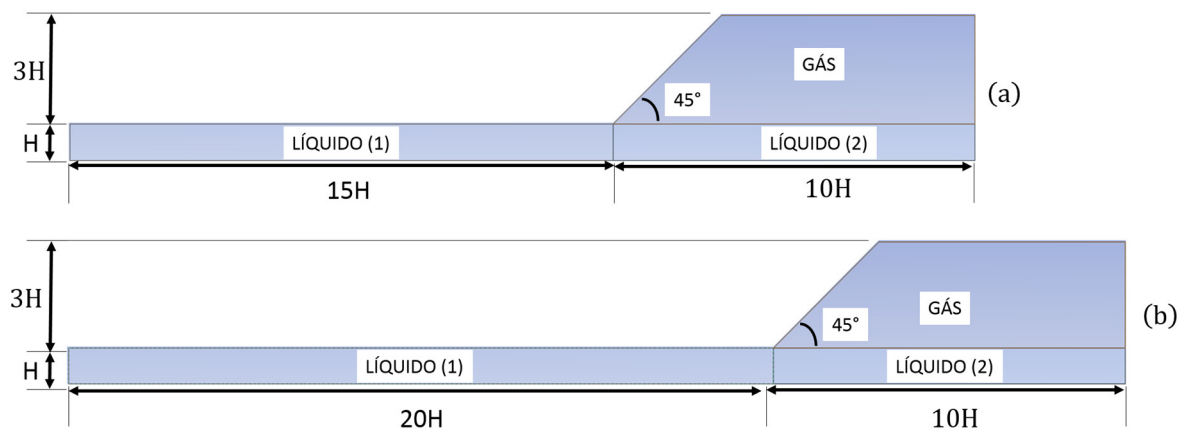
3.5 Teste de independência das fronteiras

Foi utilizada a ferramenta de criação de geometria *DesignModeler*. A geometria inicial criada é mostrada na **Figura 28** (a). Como em SÓLIDO não haverá nenhum fluxo de fluidos por representar uma superfície da área de injeção do fluido a geometria nessa região foi suprimida, como mostra a **Figura 28** (b). LÍQUIDO (1) representa a região em que o fluido está entre duas paredes. Uma parede superior fixa e um substrato inferior com movimento. Em LÍQUIDO (2) existe apenas uma parede inferior com substrato em movimento. É nessa região que existe a superfície livre, por estar em contato com uma região com gás, que é representado por GÁS.

Essas dimensões serão alteradas para realização de um estudo de independência das fronteiras, ou seja, analisar a interferência da geometria na simulação. Inicialmente a parte horizontal de LÍQUIDO (1) foi alterada (**Figura 29**), para analisar a influência da condição de entrada (*Inlet*) no escoamento. Tanto as dimensões de GÁS, quanto de LÍQUIDO (2) foram alteradas (**Figura 30**), para verificar a influência das condições de saída (*Outlet*). Ou seja, a geometria é escolhida de forma a não perturbar os campos de velocidade e de pressão da região líquida.

Depois da malha ser escolhida em função da geometria inicial, mostrada na **Figura 28** (b), suas dimensões são alteradas (**Figura 29** e **Figura 30**) para verificar a interferência das condições de contorno na simulação através da análise dos vetores velocidade e a da espessura mínima de cada geometria em comparação a inicial.

Figura 28: Geometria inicial utilizada nesse trabalho.

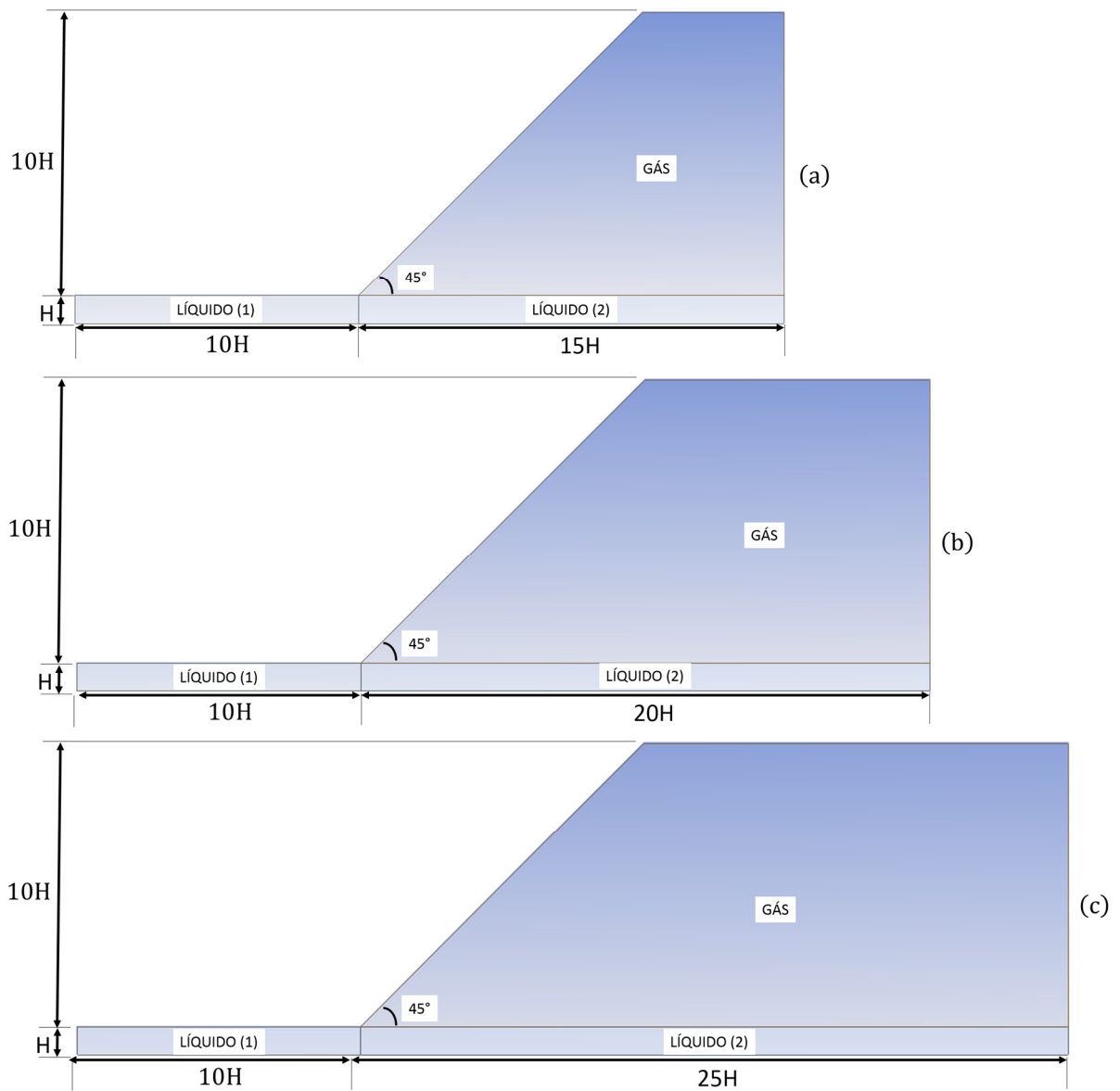
Figura 29: Geometrias utilizadas para análise de *far field* na condição de entrada com (a) geometria da esquerda ampliada para $15H$ e (b) $20H$.

A parte horizontal esquerda foi alterada [Figura 29 (a) e (b)] de $10H$ para $15H$ e $20H$. Para analisar a influência da condição de entrada no escoamento. Essas mudanças não geraram uma diferença na espessura mínima obtida inicialmente de $31,1 \mu\text{m}$ com a geometria inicial. Existe alteração no tempo de simulação, em que a geometria inicial é 17% mais rápida que a geometria com $15H$ e 29% quando comparada a geometria com $20H$, como mostra a Tabela 7. Esse aumento ocorre pelo maior número de elementos da malha com o aumento da geometria.

Tabela 7: Relação entre a geometria horizontal esquerda com o tempo de simulação e o número de elementos da malha.

Geometria horizontal esquerda	Tempo de simulação, min	Número de elementos da malha
10H (inicial)	17	9962
15H	20	11071
20H	22	12167

Figura 30: Geometrias utilizadas para análise de *far field* na condição de saída com (a) geometria da direita ampliada para 15H, (b) 20H e (c) 25H.

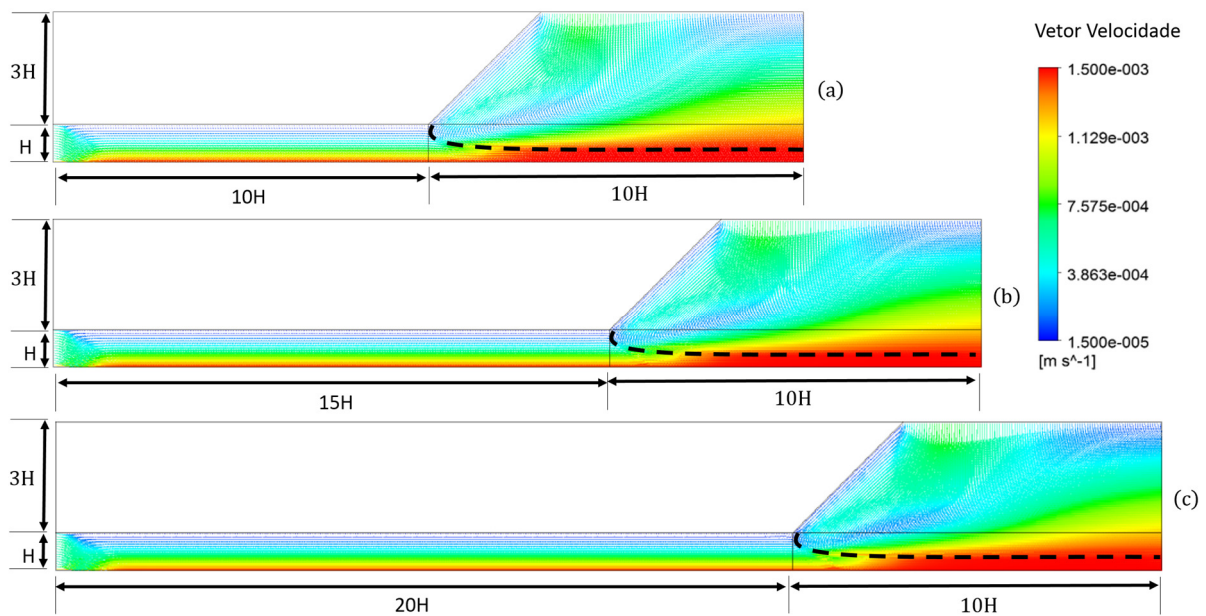


Os vetores velocidade apresentados na **Figura 31** (a) mostra que o desenvolvimento dessa velocidade é rápido no escoamento e distante da região com

o menisco (linha pontilhada), desse modo as geometrias mostradas na **Figura 31** (b) e (c) não trazem alteração em relação a inicial.

Tanto a dimensão horizontal direita (de $10H$ para $15H$, $20H$ e $25H$) quanto a dimensão vertical (de $3H$ para $10H$) foi alterada [**Figura 30** (a), (b) e (c)], com intuito de verificar a influência das condições de saída no resultado da simulação.

Figura 31: Vetores velocidade das geometrias utilizadas para análise de *far field* na condição de entrada com (a) geometria inicial, (b) $15H$ e (c) $20H$.



As mudanças não alteraram a espessura mínima de $31,1 \mu\text{m}$ encontrada com a geometria inicial. O tempo de simulação foi a maior diferença como mostra a **Tabela 8**. Em que para todos os casos a dimensão vertical foi aumentada, e a geometria inicial foi 176% mais rápido quando comparado a geometria com $15H$, 276% em relação a geometria com $20H$ e 412% mais rápido que a geometria com $25H$.

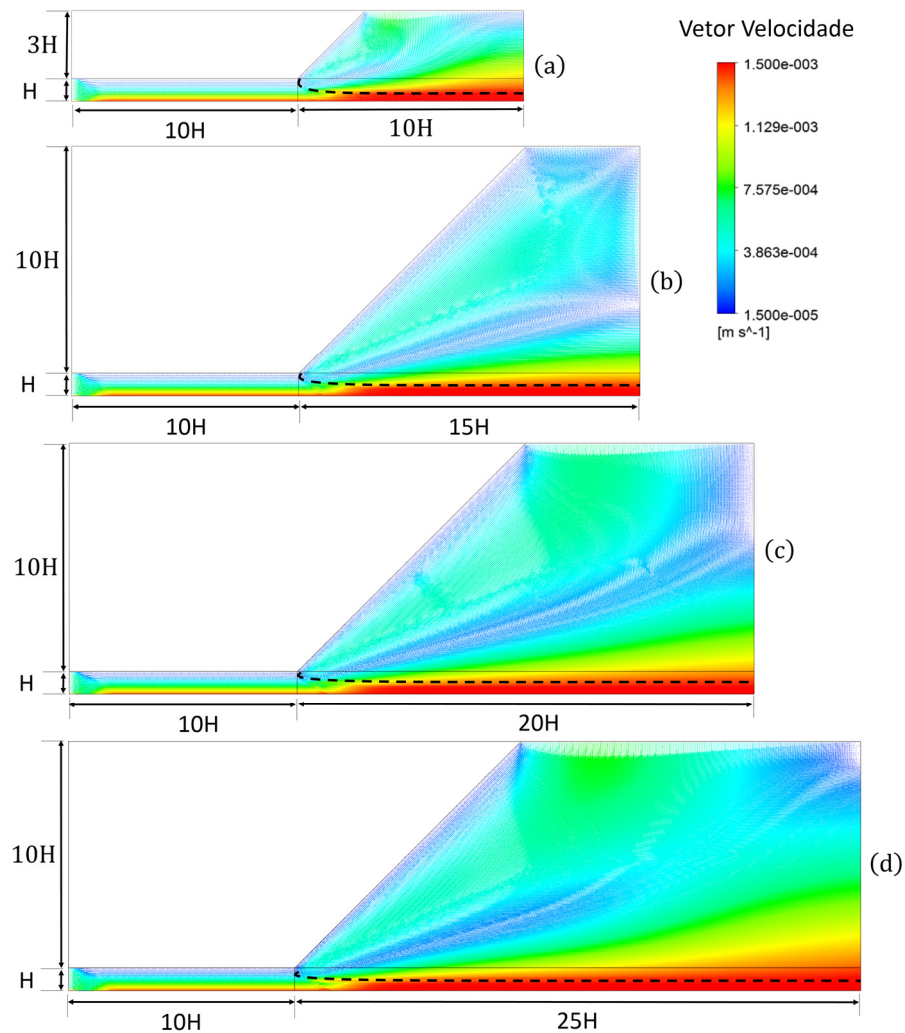
Os vetores velocidade mostrados na

Figura **32** (a) mostra que existe uma região próxima ao menisco (linha pontilhada) com velocidades maiores, em torno de $0,7575 \text{ mm/s}$, que poderia influenciar no resultado do problema. Mas, como mostra as

Figura **32** (b), (c) e (d) essa região foi deslocada da proximidade do menisco e a espessura mínima do problema permaneceu a mesma. Ou seja, a geometria escolhida é a inicial pois tem um tempo computacional consideravelmente menor e não sofreu influência das condições de contorno.

Tabela 8: Relação da geometria horizontal esquerda com o tempo de simulação e a espessura mínima.

Geometria horizontal direta	Tempo de simulação, min	Número de elementos da malha
10H (inicial)	17	9962
15H	47	27343
20H	64	39253
25H	87	51147

Figura 32: Vetores velocidade das geometrias utilizadas para análise de *far field* na condição de saída com (a) geometria inicial, (b) 15H, (c) 20H e (d) 25H.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

Todos os resultados aqui mostrados foram realizados com computador Windows 8.1 *Home Single Language* de 64 bits, com processador Intel Core i7-4500U e 8 GB de memória RAM.

4.1 Fluido newtoniano (cenário 1)

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 9**, e um número de capilaridade, $Ca = \mu V / \sigma$, é calculado.

Tabela 9: Especificação dos casos gerais estudados no cenário 1.

Casos	V_w , mm/s	Ca	Q, mg/s
1	2,5	2,508	250 150 100 95 75 55
2	2,0	2,006	250 150 95 79 55 45
3	1,5	1,505	250 150 95 57 45 25
4	0,5	0,502	45 35 25 20 18 15
5	0,3	0,301	35 25 20 15 10 5
6	0,055	0,05	5 1 0,17 0,15

Utilizando os dados de passo de tempo (Δt_{CFL} ou Δt_{BKZ}) do **tópico 03.3**, o Número de Courant ($C_o = \Delta t V_w / \Delta x$) é calculado, com o máximo de cada elemento da malha (Δx), como $6,8 \mu\text{m}$, e mostrado na **Tabela 10**. Utilizando os dados de entrada apresentados na **Tabela 9**, os resultados da simulação são apresentados na **Tabela 11**, destacando que todos o procedimento é similar ao apresentado no **tópico 03.4** sobre **Teste de dependência de malha**, e portanto, não são mostrados novamente.

Tabela 10: Especificação dos números de Courant (Co) do cenário 1.

Casos	V_w , mm/s	Δt , s	C_o
1	2,5	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	2,5
2	2,0	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	2,0
3	1,5	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	1,5
	1,5	$\Delta t_{BKZ} = 0,0002$	0,045
4	0,5	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	0,5
5	0,3	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	0,3
6	0,05	$\Delta t_{BKZ} = 0,0002$	0,0015

Tabela 11: Resultados da vazão da vazão crítica para o cenário 1.

Casos	Re	Δt_{sim} , min	Q_{min} , mg/s	t_{min} , μm	h
1	0,0169	17	100	35,6	2,8090
2	0,0135	17	79	33,3	3,0030
3	0,0102	17	57	31,1	3,2154
4	0,0034	17	18	21,4	4,6729
5	0,0020	17	10	20,7	4,8309
6	0,0004	1150	0,17	6,7	14,9254

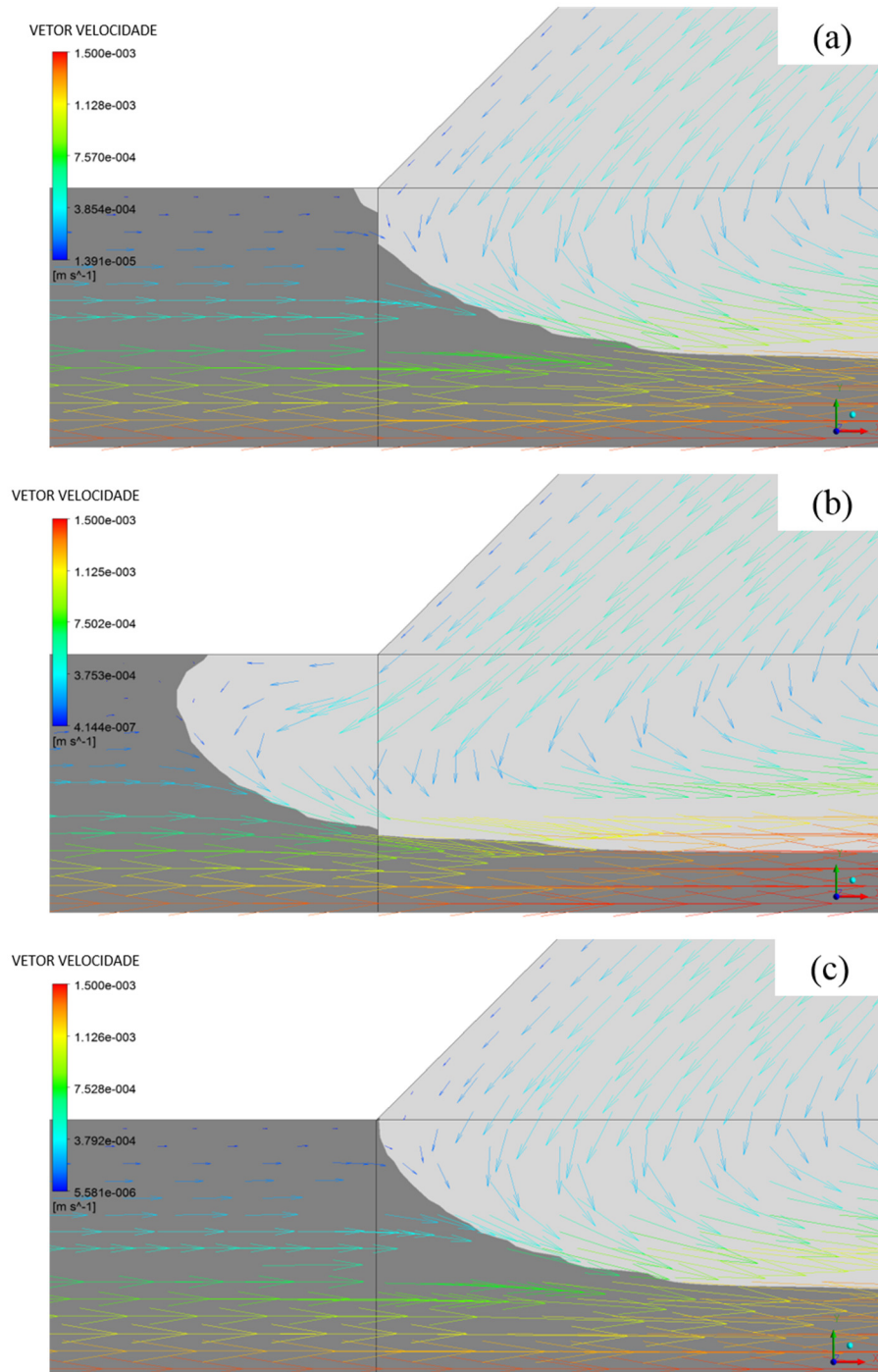
A configuração antes do menisco invadir a separação barra/substrato é apresentada em detalhe na **Figura 33** (a). Já na **Figura 33** (b) a configuração do escoamento logo após o limite de vazão mínima é apresentada. Nesta figura, os vetores velocidade na região do gás e do líquido permitem evidenciar que após o limite de vazão mínima o gás (ar) é arrastado em direção à fenda de alimentação de líquido, criando uma região de recirculação na região inicialmente preenchida pelo líquido. Na **Figura 33** (a), o menisco não está bem definido, como mostrado anteriormente o passo de tempo utilizado foi o de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL), $\Delta t_{CFL} = 0,0068$ s

Para melhorar essa superfície o passo de tempo foi reduzido para o passo de Brackbill, Kothe e Zemach (BKZ), $\Delta t_{BKZ} = 0,0002$ s. Essa nova simulação é apresentada em **Figura 33** (c).

Com a redução do passo de tempo o menisco ficou melhor definido, mas, o tempo de simulação aumentou de maneira considerável 17 min para 115 min, ou seja, quase sete vezes maior que o passo de tempo de Courant–Friedrichs–Lewy. Em ambos os casos a espessura mínima foi de 31,1 μm . Desse modo para encontrar um

resultado de maneira rápida é recomendado o passo de tempo de CFL e para uma melhor definição da superfície livre o de BKZ.

Figura 33: Captura do limite de vazão mínima que ocorre entre (a) as vazões de 57 mg/s e passo de tempo CFL, (b) 45 mg/s e passo de tempo CFL e (c) 57 mg/s e passo de tempo BKZ, correspondentes ao Caso 3 com $Ca = 1,505$.



Nos casos de 1 até 5 não foi encontrado zonas de recirculação. Sabe-se que

não é sempre que esses vórtices aparecem no escoamento. Sartor (1990) apresentou um extenso trabalho experimental e teórico referente ao processo de revestimento por extrusão de camada única e segundo esse estudo vórtices aparecem quando a espessura de filme é menor que a terça parte do espaçamento entre a barra e o substrato. Com base nessa constatação os casos 3, 4 e 5 deveriam apresentar esse efeito, mas não o fizeram.

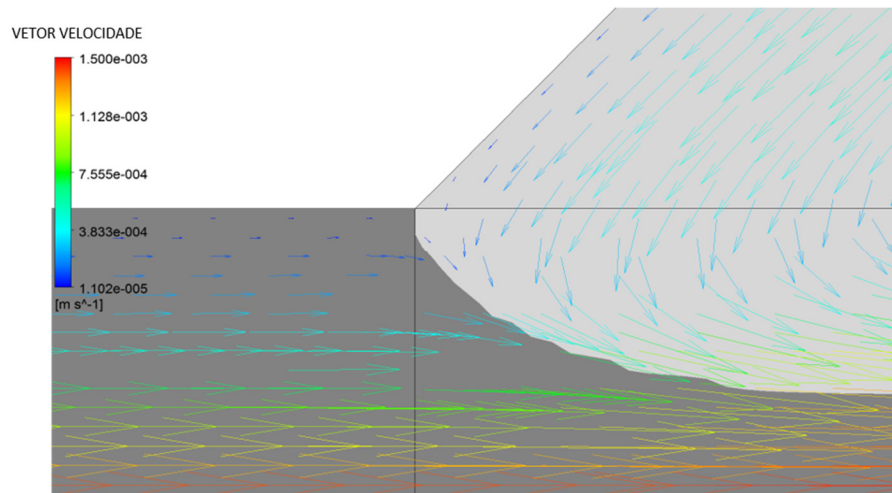
Desse modo, baseado em Morais *et al.* (2016) alguns parâmetros numéricos aplicados a este trabalho foram modificados, ver Tabela 12, para verificar se com essa alteração as recirculações podem ser localizadas, esse resultado pode ser verificado na **Figura 34**.

Tabela 12: Parâmetros numéricos modificados.

Parâmetros numéricos	Default	Morais <i>et al.</i> (2016)
Acoplamento pressão-velocidade	SIMPLE	PISO
Discretização espacial do gradiente	<i>Least Squares Cell Based</i>	<i>Least Squares Cell Based</i>
Discretização espacial da pressão	PRESTO!	PRESTO!
Discretização espacial da quantidade de movimento	<i>Second Order Upwind</i>	QUICK
Discretização espacial da fração volumétrica	Geo-Reconstruct	CICSAM
Formulação transiente	<i>First Order Implicit</i>	<i>First Order Implicit</i>

A **Figura 34** mostra que essa mudança melhorou a definição do menisco em relação a **Figura 33** (a), com um tempo de simulação de 25 minutos (47% maior quando comparado com os parâmetros anteriores) e uma espessura mínima igual a encontrada utilizando os parâmetros iniciais. Mas não detectou a presença de recirculações.

Figura 34: Captura da vazão mínima de 57 mg/s e passo de tempo CFL correspondentes ao Caso 3 em que $Ca = 1,505$ utilizando os parâmetros de simulação de Moraes *et al.* (2016).



Nam e Carvalho (2010) mostraram que o aparecimento desses vórtices acontece para uma combinação de parâmetros com número de capilaridade na ordem de 0,25 ou menor, desse modo todos os valores até o caso 5 são de ordem maior. A simulação do caso 6 é realizado com o valor de capilaridade 0,05 apresentado por Araujo (2014), pois seu estudo apresenta as recirculações.

Com a redução da velocidade do substrato e conseqüentemente da capilaridade as recirculações foram localizadas, como mostra a **Figura 35** (b) e (c).

Mas, não é sempre que os vórtices serão formados, como na **Figura 35** (a) uma vez que a espessura do depositada é maior que a terça parte do espaçamento entre a barra e o substrato. A **Figura 35** (d) mostra um revestimento defeituoso devido à baixa vazão de entrada.

Para verificar se a presença dos vórtices está relacionada com a redução da velocidade do substrato ou da capilaridade uma simulação foi realizada mantendo a capilaridade de 0,05 com a velocidade de placa do caso 3, ou seja, de 1,5 mm/s. A **Figura 36** mostra esse resultado, com as recirculações. Ficando evidente que a influência está em função de baixos valores de capilaridade e não apenas na redução da velocidade do substrato.

Figura 35: Vetores velocidade para o caso 6 com de vazões de 5 mg/s (a), 1 mg/s (b), 0,17 mg/s (c) e (d) 0,15 mg/s.

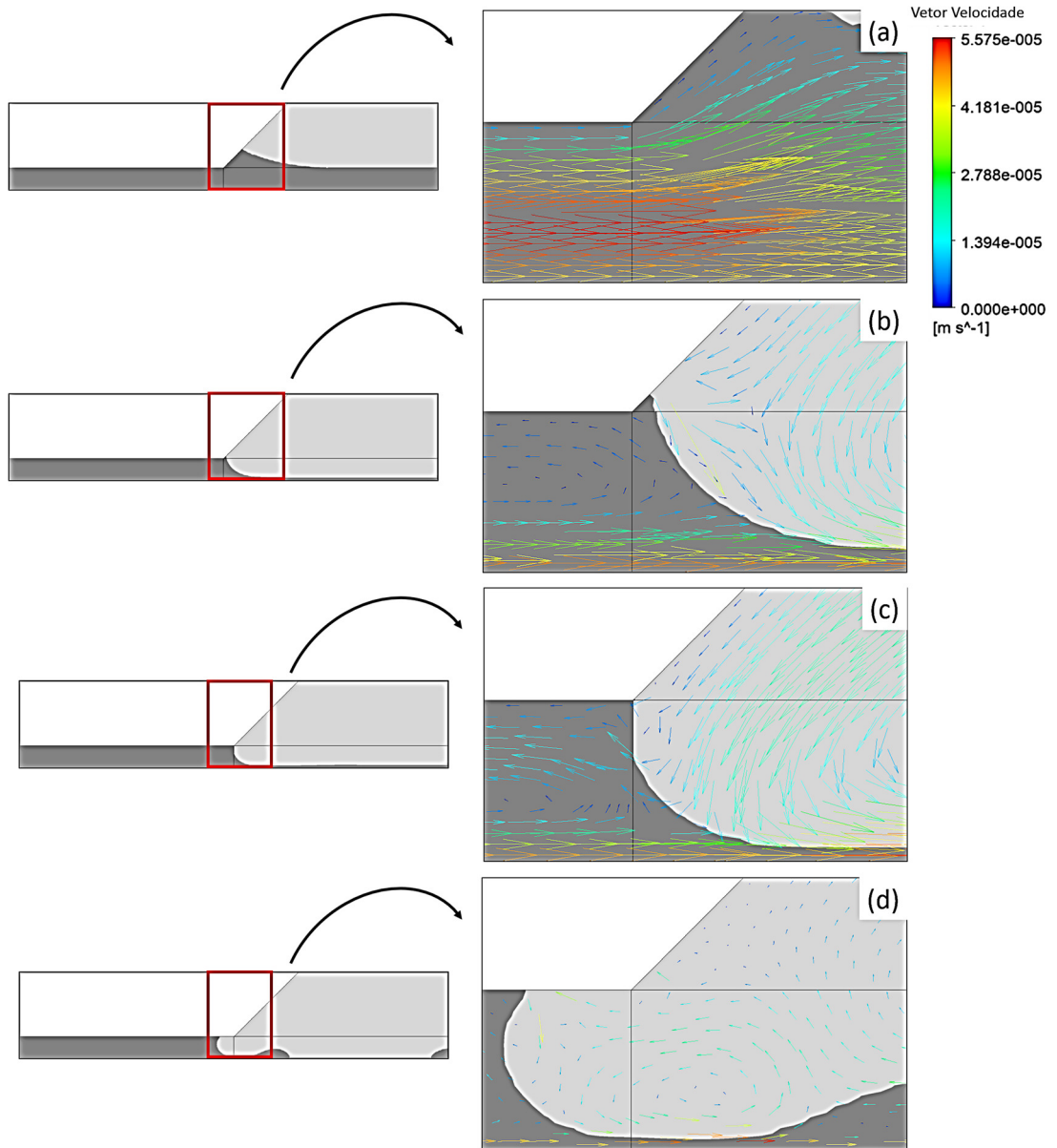


Figura 36: Vetores velocidade para uma capilaridade de 0,05, velocidade de substrato de 1,5 mm/s e vazão de entrada de 17 mg/s.

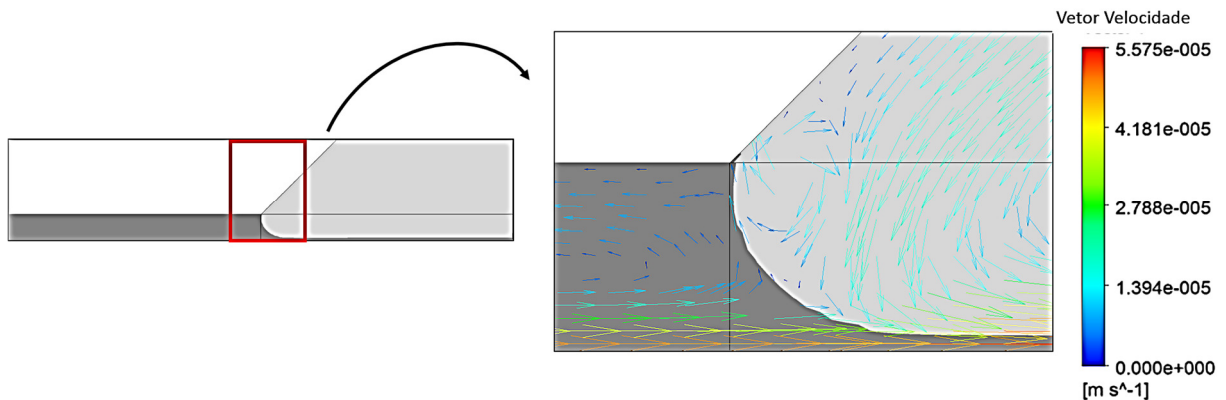
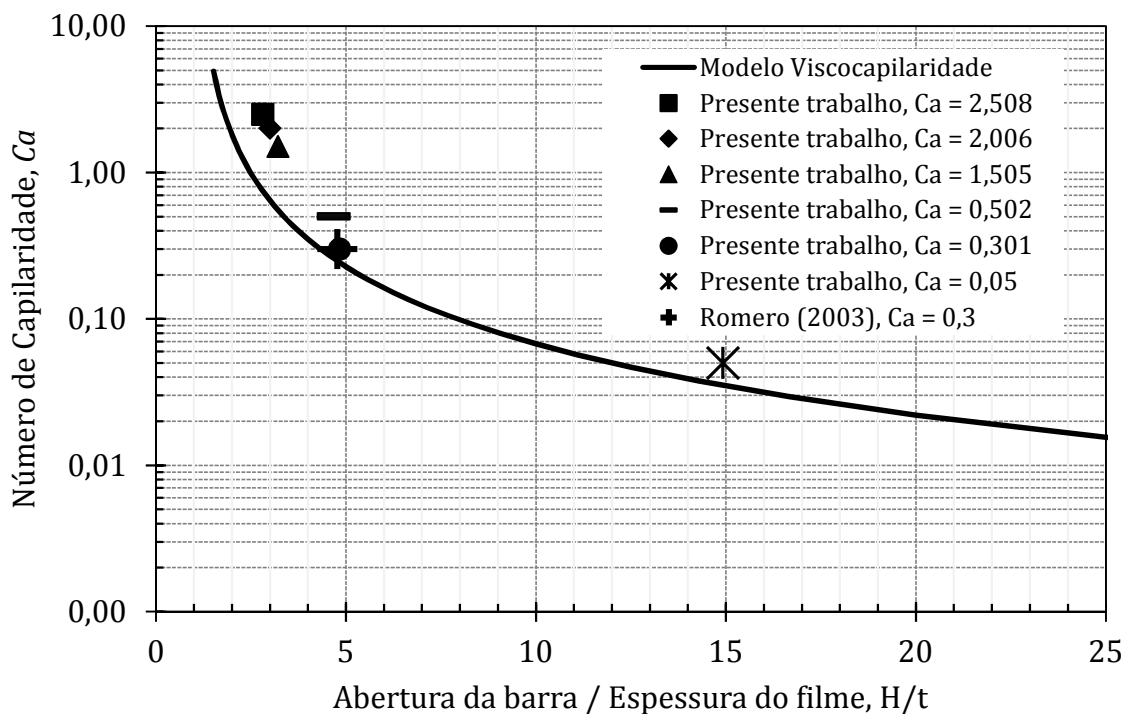


Figura 37: Número de capilaridade em função da abertura entre a barra e a espessura do filme.



Por fim, os resultados apresentados na **Figura 37** relaciona o número de capilaridade com espessura adimensional de todos os casos simulados, juntamente com o modelo de viscocapilaridade obtido através da Equação (7). Essa figura representa a janela de operação do processo, uma vez que as curvas construídas identificam o limite de vazão mínima e separam duas regiões: à esquerda um revestimento estável e livre de defeitos é obtido; e à direita um revestimento defeituoso é produzido.

O trabalho está de acordo com o trabalho de Romero (2003), em que para uma capilaridade de 0,3 espessura adimensional encontrada é de 4,78 enquanto que o caso 5 (capilaridade 0,301) a espessura adimensional encontrada é de 4,67, como mostra a **Figura 37**.

4.2 Fluido não-newtoniano (cenário 2)

Segundo Fox e McDonald (2006), Tropea, Yarin e Foss (2007) e Morais *et al.* (2009), um fluido é denominado não-newtoniano quando a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação. Desse modo, adotando a mesma geometria, malha, parâmetros de solução e passo de tempo (Tabela 14) do cenário newtoniano. Com a diferença do fluido líquido não ter mais uma viscosidade constante, mas utiliza a equação de Carreau para fluidos não-newtonianos que descreve o comportamento da viscosidade do líquido em relação a taxa de cisalhamento. Os valores utilizados nesse estudo são demonstrados na **Tabela 13**. Três parâmetros do modelo de Carreau $\eta_0 = 0,001$ Pa.s, $\eta_\infty = 0,0007$ Pa.s e $\lambda = 0,9$ s não são alterados, enquanto que o índice *power law* é diminuído de $n = 1$ para 0,8 e posteriormente para 0,7. Esses valores foram utilizados para o método de solução numérico conseguir encontrar uma solução.

A representação gráfica da resposta do modelo é observada na **Figura 38**.

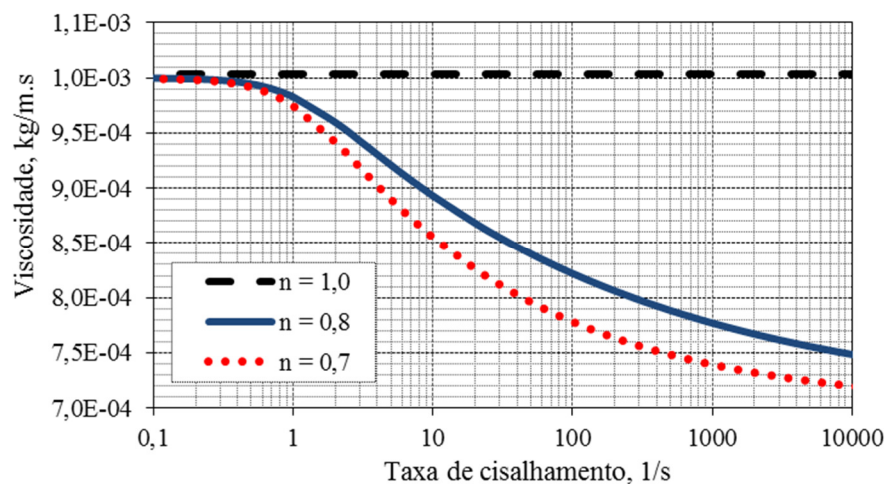
Tabela 13: Casos estudados neste trabalho, outros parâmetros de Carreau são mantidos constantes.

Casos	n	Vw, mm/s	Ca	Q, mg/s
1	1,0	2,5	2,508	250 150 100 75 55
2	0,8	2,5	2,508	250 150 98 75 55
3	0,7	2,5	2,508	250 150 97 75 55
4	1,0	2,0	2,006	250 150 95 79 45
5	0,8	2,0	2,006	250 150 95 77 45
6	0,7	2,0	2,006	250 150 95 76 45
7	1,0	1,5	1,505	250 150 95 57 25
8	0,8	1,5	1,505	250 150 95 55 25
9	0,7	1,5	1,505	250 150 95 54 25

Tabela 14: Especificação dos números de Courant (Co) do cenário 2.

Casos	V_w , mm/s	Δt , s	C_o
1	2,5	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	2,5
2	2,5	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	2,5
3	2,5	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	2,5
4	2,0	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	2,0
5	2,0	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	2,0
6	2,0	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	2,0
7	1,5	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	1,5
8	1,5	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	1,5
9	1,5	$\Delta t_{CFL} = 0,0068$	1,5

Figura 38: Função viscosidade descrita pelo modelo de Carreau para $\eta_0 = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\eta_\infty = 0,0007 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\lambda = 0,9 \text{ s}$ e diversos valores do expoente n na equação (12).



Quanto menor o expoente n mais acentuada é a diminuição da viscosidade do líquido com o aumento da taxa de cisalhamento e com isso mais distante do comportamento newtoniano é a resposta do fluido considerado.

Utilizando os dados do caso 8 apresentados na **Tabela 13** é fixada uma velocidade do substrato V_w em 1,5 mm/s, e com as propriedades do líquido e do gás mostrados na seção para fluido newtoniano, a vazão de alimentação de líquido Q é diminuída gradativamente a partir de 250 mg/s, de acordo com os valores mostrados na **Tabela 15**. Com isso a espessura de filme t também reduziu.

Tabela 15: Resultados obtidos com as condições do caso 8.

Caso 8: itens	Q, mg/s	t, μm
a	250	166,7
b	150	100,0
c	95	57,8
d	55	28,9
e	25	20,0

Destacando que para os outros casos da **Tabela 13** o procedimento é similar e, portanto, não são mostrados. Os resultados são apresentados na **Tabela 16**, e na **Figura 39** tem-se o registro desta sequência.

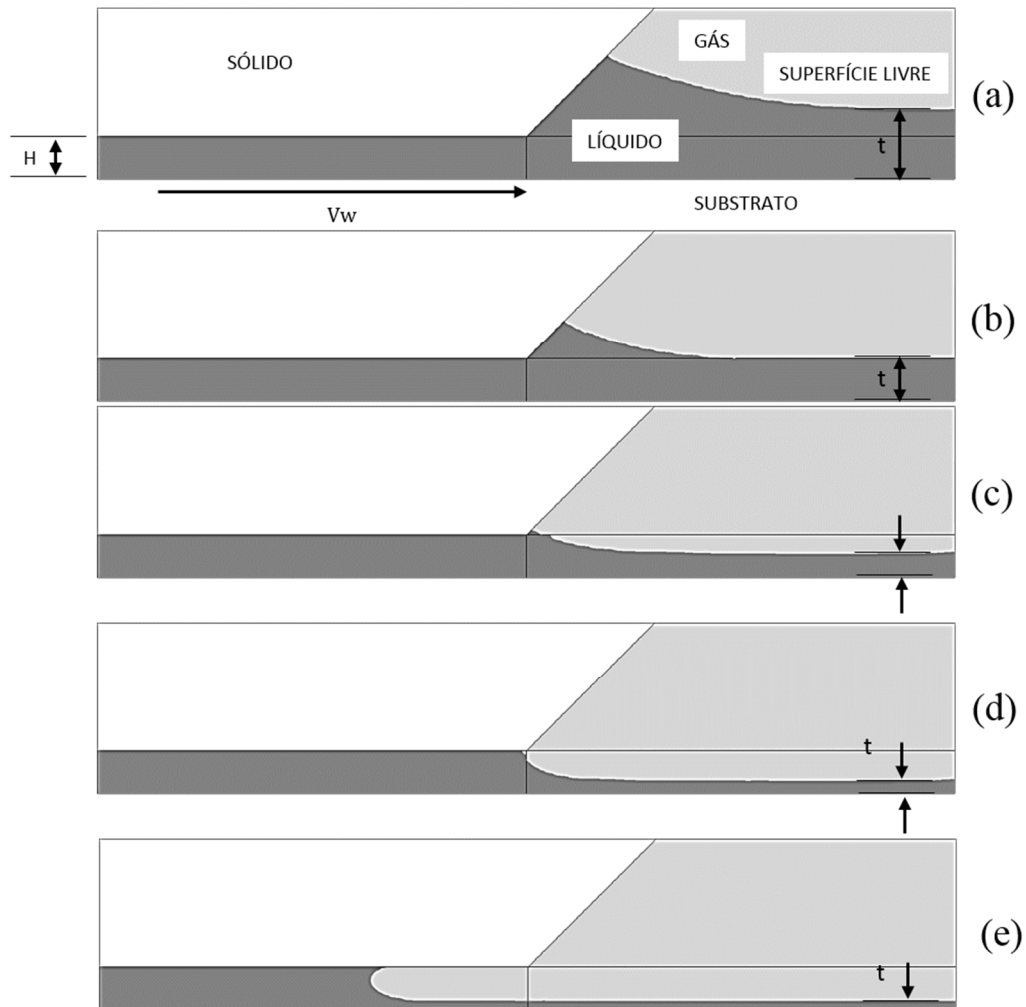
Observa-se na **Figura 39** (d) que a curvatura da superfície livre se torna mais acentuada perto da linha de contato estática, até o instante em que o balanço de forças é alterado devido ao aumento da importância das forças capilares e a convergência do processo de solução torna-se mais difícil.

Na **Figura 39** (d), que corresponde à vazão de 55 mg/s e espessura mínima de 28,9 μm , 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. Tanto a **Figura 39** (a), (b) e (c) apresentam defeitos de excesso de material depositado, em (e) a superfície livre se desprende da linha de contato estática.

Tabela 16: Resultados da vazão crítica em relação ao índice de *power law*, n, para o cenário 2.

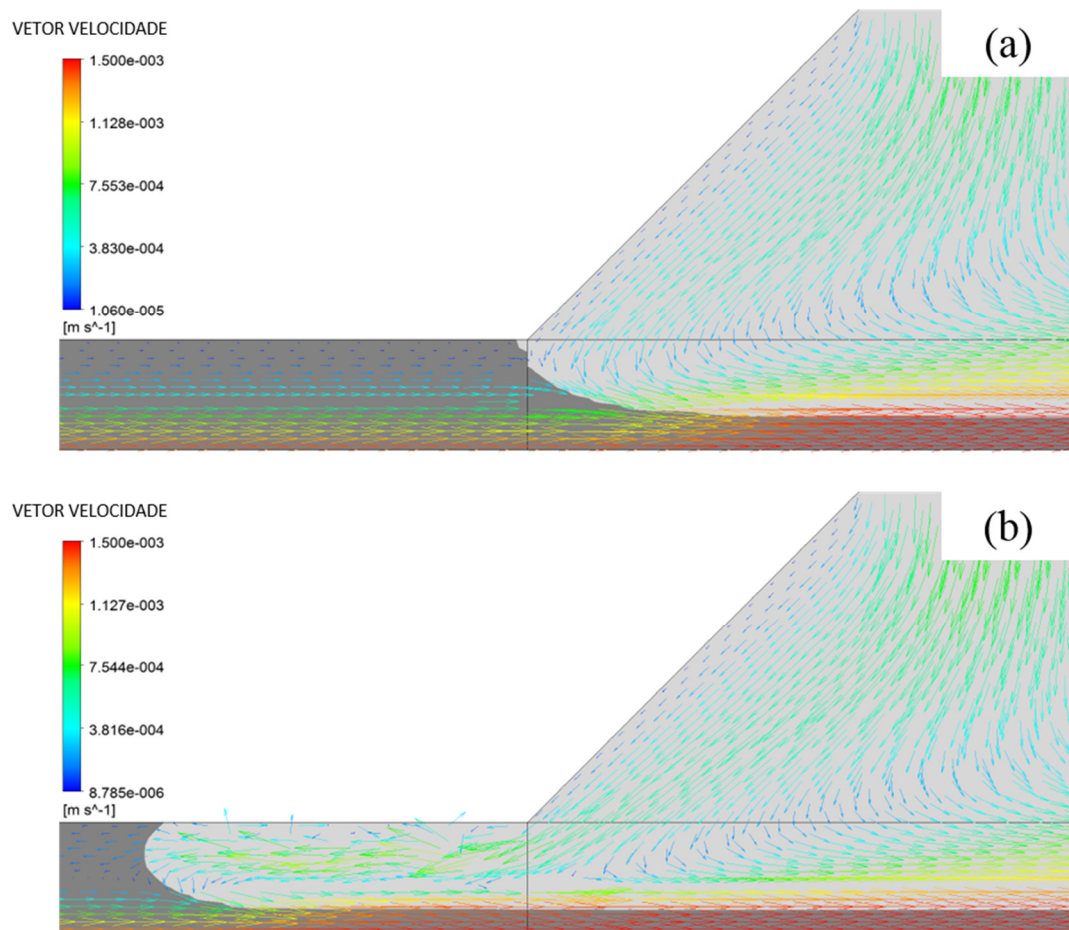
Casos	n	Ca	Re	$\Delta t_{\text{sim, min}}$	$Q_{\text{min, mg/s}}$	$t_{\text{min, } \mu\text{m}}$	h
1	1,0	2,508	0,016	17	100	35,6	2,8090
2	0,8	2,508	0,019	19	98	33,3	3,0030
3	0,7	2,508	0,020	19	97	32,2	3,1056
4	1,0	2,006	0,013	17	79	33,3	3,0030
5	0,8	2,006	0,015	19	77	32,2	3,1056
6	0,7	2,006	0,015	19	76	31,1	3,2154
7	1,0	1,505	0,010	17	57	31,1	3,2154
8	0,8	1,505	0,011	19	55	28,9	3,4602
9	0,7	1,505	0,011	19	54	27,8	3,5971

Figura 39: Forma e posição da superfície livre para diferentes espessuras (em μm): (a) 166,7; (b) 100,0; (c) 57,8; (d) 28,9; (e) 20,0. Para o caso 8.



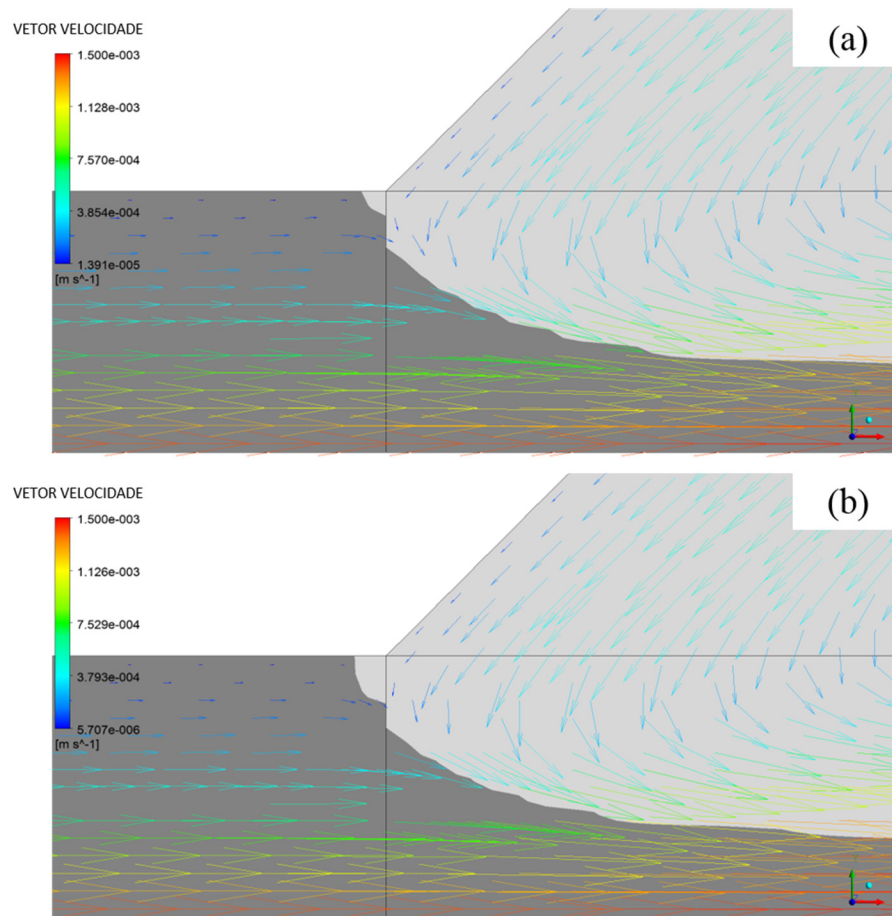
A configuração antes do menisco invadir a separação barra/substrato é apresentado em detalhe na **Figura 40** (a). Já na **Figura 40** (b) a configuração do escoamento logo após o limite de vazão mínima é apresentada, onde, embora o movimento do substrato seja da esquerda para a direita na figura, o menisco se movimenta em sentido oposto. As recirculações não ocorrem, pois, como mostrado na simulação com fluido newtoniano, tanto a espessura do filme depositado deve ser menor que a terça parte do espaçamento entre a barra e o substrato, quanto a capilaridade deve ser na ordem de 0,25.

Figura 40: Captura do limite de vazão mínima que ocorre entre as vazões de 55 mg/s (a) e 25 mg/s (b) correspondentes ao caso 8 em que $Ca = 1,505$.



Uma comparação do limite de vazão mínima entre os casos para fluido newtoniano, **Figura 33**, e não-newtoniano, **Figura 40**, é apresentada na **Figura 41**. Os parâmetros de simulação se diferem no valor da vazão mínima, sendo 57 mg/s para o fluido newtoniano e 55 mg/s para o não-newtoniano, o que acarreta uma espessura mínima menor para o segundo caso, 28,9 μm , em relação ao primeiro, 31,1 μm . Apesar da espessura ser reduzida o tempo de simulação é maior, enquanto no caso newtoniano é de 17 min para o não-newtoniano é de 19 min. Mas, as diferenças não são apresentadas na forma do menisco, como mostra a **Figura 41**.

Figura 41: Captura do limite de vazão mínima que ocorre entre as vazões de (a) 57 mg/s para fluido newtoniano e (b) 55 mg/s para fluido não newtoniano ambos com $Ca = 1,505$.



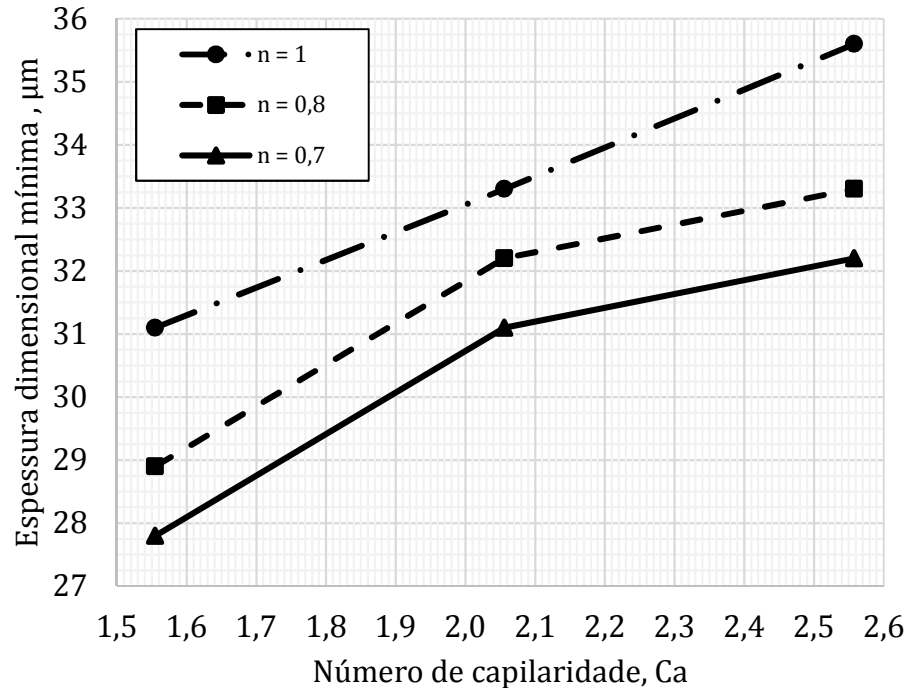
A espessura do filme dimensional t é apresentado na **Figura 42** para três valores do índice de *power law* n e três valores do número de capilaridade Ca . O índice $n = 1$ recupera o comportamento newtoniano. Desse modo a taxa de cisalhamento reduz com o aumento do índice de *power law*.

Na equação (12) a função viscosidade é constante e igual a $\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 = 0,001$ Pa.s. Como mostrado por Garuzzi e Romero (2015a) e Garuzzi e Romero (2015b) para o caso newtoniano, a espessura mínima de filme depositado no substrato aumenta com o número de capilaridade. Esta tendência é observada também para os casos não-newtoniano. Entretanto, para um valor fixo do número de capilaridade, a espessura mínima de filme diminui com o aumento da importância do comportamento não-newtoniano. As linhas do gráfico são para três índices de *power-law*.

Estes resultados apresentam a mesma tendência observada por Bhamidipati *et*

al. (2011), mas seus resultados são apresentados para capilaridades abaixo de 1, portanto não são plotados nessa análise.

Figura 42: Espessura dimensional, t , em função do número de capilaridade, Ca , e dos índices de Power Law, n .



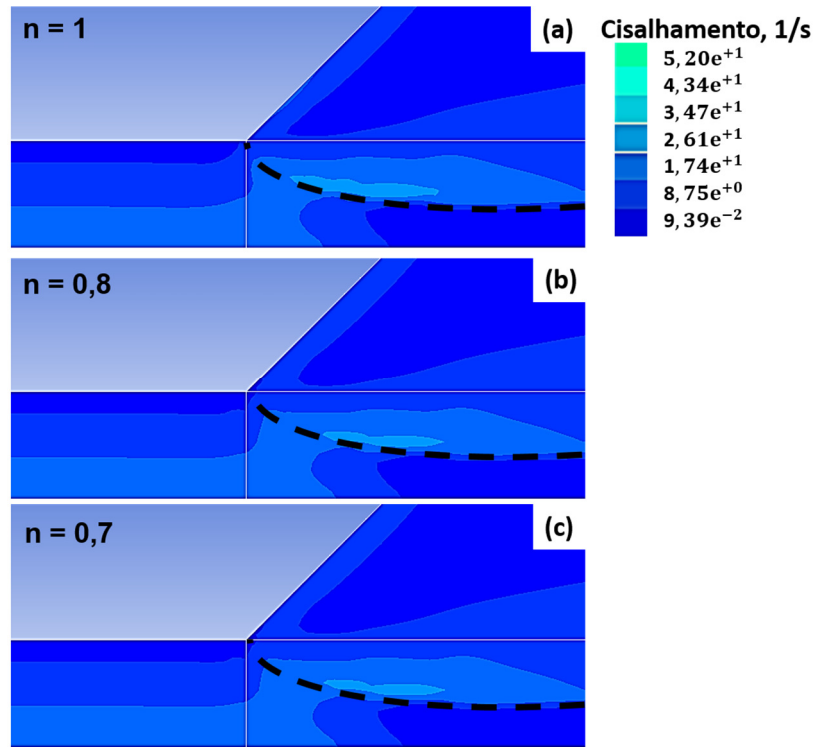
Os conceitos de tensão de cisalhamento e taxa de deformação são usados para descrever a deformação e o escoamento do fluido. O gradiente de velocidade entre as camadas laminares gera um fluxo de força mecânica (tensão de cisalhamento) (BERIS e GIACOMIN, 2014). Com o auxílio do *software* comercial *FLUENT* da ANSYS (ANSYS, 2012) foi realizado o cálculo do cisalhamento através da equação (30):

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{dx} + \frac{du}{dy} \right) \quad (30)$$

Para analisar apenas do aumento do comportamento não-newtoniano, foi fixada uma velocidade de substrato em 1,5 mm/s e uma vazão de entrada de 57 mg/s. O resultado é apresentado na **Figura 43**, que mostra a região do menisco (linha pontilhada). Tem-se que o cisalhamento reduz com o aumento do índice de *power-law*. Como a espessura encontrada será maior com o aumento do comportamento

não-newtoniano a área aberta ao fluxo também será maior, e como consequência a taxa de deformação menor.

Figura 43: Cisalhamento máximo no menisco de (a) 26,059 1/s; (b) 25,996 1/s; (c) 25,992 1/s para uma velocidade de substrato de 1,5 mm/s e uma vazão de entrada de 57 mg/s.



4.3 Fluido newtoniano com partículas (cenário 3)

Soo (1989), Sahimi (1995) e Herrmann (2004) definem escoamento com partículas como sendo uma região suficientemente grande para conter muitas partículas, mas suficientemente pequena para ser utilizada como elemento de integração. Para isso será utilizado o método apresentado anteriormente conhecido como DPM. Segundo ANSYS (2012) para utilizar o método DPM o parâmetro conhecido como coeficiente de arrasto C_D , (que mede a interação fluido-partícula) definido anteriormente e é calculado através das equações:

$$C_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_C} \quad (31)$$

sendo ρ_p é a massa específica da partícula, d_p é o diâmetro da partícula e C_C a correlação de Cunningham definida como

$$C_C = 1 + \frac{2(1 - \phi)}{d_p} [1,257 + 0,4 \exp(-1,1d_p/2(1 - \phi))] \quad (32)$$

em que ϕ representa a fração de partículas do escoamento, ou seja, a porcentagem de partículas em relação ao total mássico de fluido.

Após calculado o coeficiente de arrasto é encontrado o número de Stokes, Stk , para medir a interação fluido-partícula. Se o valor encontrado for menor do que um as partículas não influenciam no escoamento, e é calculado através das equações (ANSYS, 2012):

$$Stk = \frac{t_c \bar{u}}{l_c} = \frac{t_c}{(l_c/\bar{u})} \quad (33)$$

$$t_c = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (34)$$

em que \bar{u} é a velocidade média do fluido, l_c é diâmetro característico do local de escoamento do fluido, que neste caso é a espessura H , t_c é o tempo característico.

Para este estudo os seguintes parâmetros com base nos trabalhos de Akbarzadeh e Hrymak (2016) e ARAUJO (2014) são adotados: $\rho_p = 2570 \text{ kg/m}^3$, $d_p = 1 \mu\text{m}$, $\mu = 1,003 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$, \bar{u} = velocidade do substrato e $l_c = 100 \mu\text{m}$. Como descrito por De LAI (2013), na formulação padrão do DPM a fração volumétrica da fase discreta das partículas, deve ser menor do que 10%, de modo que a influência desta fração volumétrica seja negligenciada no equacionamento da fase contínua.

A fração de partículas, ϕ , foi definida como a porcentagem de fluxo mássico de partículas em relação ao fluxo mássico de fluido, **equação (18)**. Com intuito da utilização da formulação DPM foram utilizados dois valores de fração mássica de partículas de 5% e 10%, e tendo como base os parâmetros de geometria, malha parâmetros de solução e passo de tempo do cenário newtoniano. Todos esses dados são mostrados na **Tabela 17**.

Tabela 17: Especificação dos casos gerais estudados no cenário 3.

Casos	Vw, m/s	ϕ , %	C _D	Stk	Δt_{CFL} , s	C ₀	Ca
1	2,5	5	0,02231	$3,559 \times 10^{-7}$	0,0068	2,5	2,508
2	2,5	10	0,02355	$3,559 \times 10^{-7}$	0,0068	2,0	2,508
3	2,0	5	0,02231	$2,847 \times 10^{-7}$	0,0068	1,5	2,006
4	2,0	10	0,02355	$2,847 \times 10^{-7}$	0,0068	2,5	2,006
5	1,5	5	0,02231	$2,135 \times 10^{-7}$	0,0068	2,0	1,505
6	1,5	10	0,02355	$2,135 \times 10^{-7}$	0,0068	1,5	1,505

Os resultados encontrados de vazão crítica e conseqüentemente de espessura mínima são similares aos do cenário newtoniano, como mostra a **Tabela 18**, uma vez que as partículas não influenciam no escoamento no modelo de solução DPM. Então, será analisada a concentração de partículas presentes no escoamento em função da velocidade do substrato, e conseqüentemente do número de capilaridade, e da fração de partículas do escoamento, ϕ .

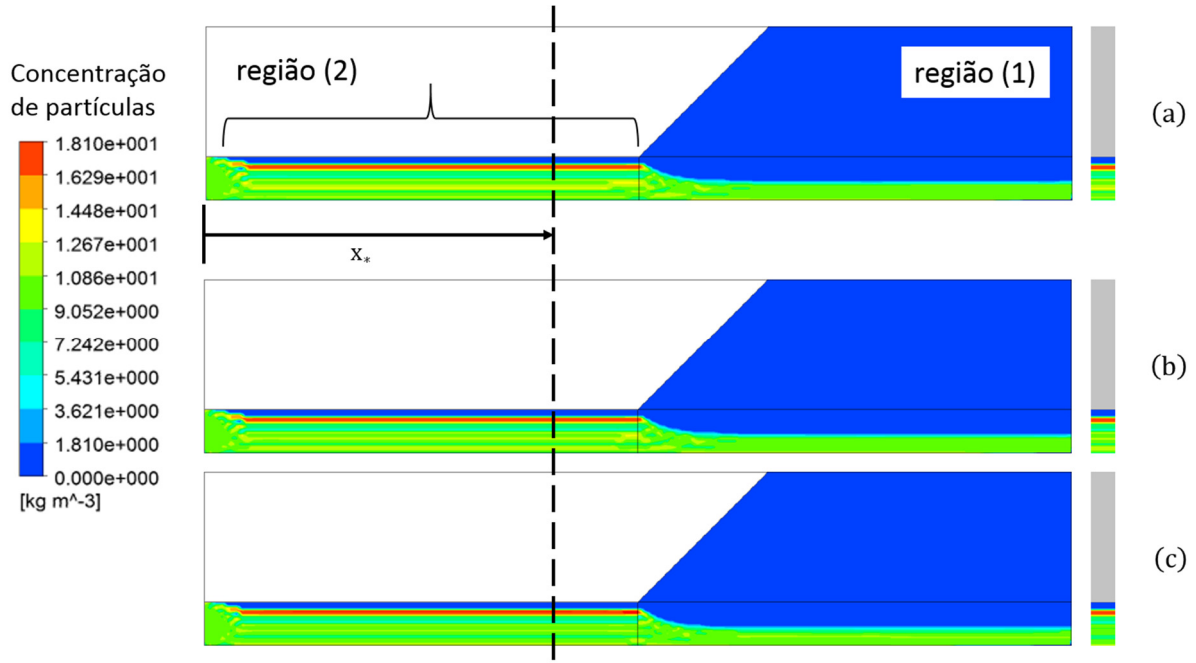
Tabela 18: Resultados da vazão crítica em relação a fração de partículas, ϕ , para o cenário 3.

Casos	ϕ , %	Ca	Re	Δt_{sim} , min	Q _{min} , mg/s	t _{min} , μ m	h
1	5	2,508	0,0169	25	100	35,6	2,8090
2	10	2,508	0,0169	25	100	35,6	2,8090
3	5	2,006	0,0135	25	79	33,3	3,0030
4	10	2,006	0,0135	25	79	33,3	3,0030
5	5	1,505	0,0102	25	57	31,1	3,2154
6	10	1,505	0,0102	25	57	31,1	3,2154

Foram realizadas simulações com 5% (**Figura 44**) e 10% (**Figura 45**) de fração de partículas. A região em azul não apresenta partículas, essa ausência ocorre por dois motivos: região (1) da **Figura 44** que contém gás, e como discutido durante todo o trabalho a região de interesse é o líquido, sendo o líquido com partículas uma representação do fluido depositado com silício, que é o que de fato acontece na indústria. O segundo motivo são que as partículas presentes no fluido caem devido a ação da gravidade, região (2) da **Figura 44**. A medida x_* é referente a localização do perfil de concentração das partículas na linha tracejada, esse perfil é mostrado ao lado direito de cada representação. As duas razões, e a medida da linha tracejada ocorrem

em todos os casos tanto da **Figura 44** quanto da **Figura 45**, mas as regiões foram mostradas apenas na **Figura 44** (a).

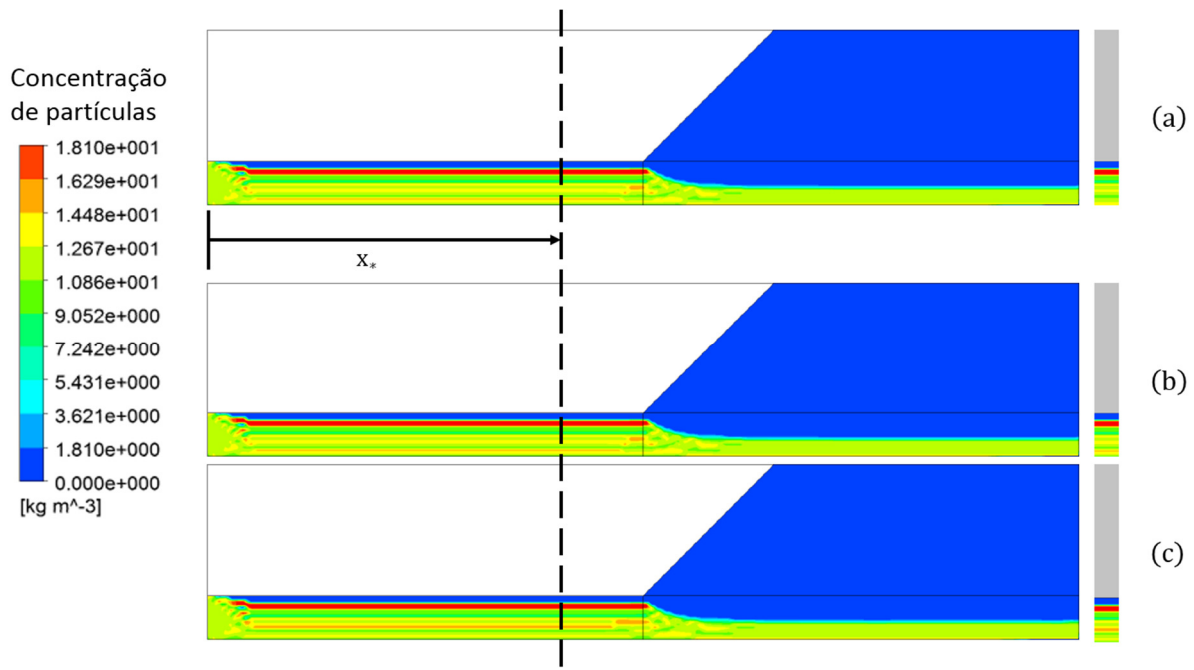
Figura 44: Concentração de partículas com as velocidades do substrato em (a) caso 1; (b) caso 3 e (c) caso 5 para fração de partículas na entrada de 5%, cenário 3.



Pode-se observar que com o aumento da fração de partículas na entrada de 5% (**Figura 44**) para 10% (**Figura 45**) ocorre um aumento da sua concentração. Com a redução da velocidade do substrato não houve variação significativa na concentração das partículas. Nas duas figuras, existe uma concentração de 18 kg/m^3 próxima a parede da região revestimento, esse aumento tem o problema dessas partículas ficarem retidas nessa região, ao invés do filme depositado.

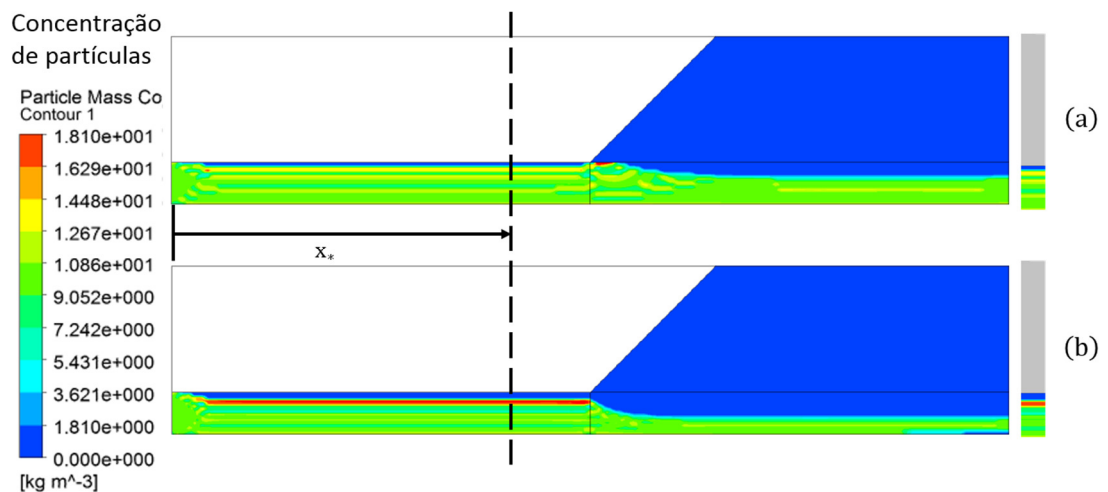
Com intuito de investigar esse problema apresentado foi realizado para uma mesma velocidade de substrato de 1,5 mm/s duas vazões de entrada foram analisadas: (a) 95 mg/s para (b) 57 mg/s, conseqüentemente uma redução na espessura de (a) 57,8 μm para (b) 31,1 μm . Em (b) tem-se a vazão crítica do sistema, e o problema da concentração de partículas na região de revestimento permanece. Mas, em (a) ocorre uma melhor homogeneidade na concentração das partículas, como mostra a **Figura 46**.

Figura 45: Concentração de partículas com as velocidades do substrato em (a) caso 1; (b) caso 3 e (c) caso 5 para fração de partículas na entrada de 10%, cenário 3.



Na **Figura 46** (a) mostra as partículas distribuídas de maneira uniforme na deposição, mas com a redução da vazão em (b) ocorre uma alta concentração de partículas na ordem de 18 kg/m^3 , situação que é prejudicial e não desejada para uma célula solar. Pois como mostrado no **CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA** todos os métodos de fabricação de filmes finos buscam uma deposição homogênea para que o material depositado esteja por igual em toda a superfície depositada.

Figura 46: Concentração de partículas para uma velocidade do substrato de $1,5 \text{ mm/s}$, fração de partículas na entrada de 5% e vazão de fluido de (a) 95 mg/s e (b) 57 mg/s .



Desse modo, uma alta concentração de partículas em uma região pode ser avaliada como desperdício de material. Portanto, não deve ser procurada apenas a vazão mínima (e conseqüentemente a espessura mínima) na deposição, mas deve ser analisado um conjunto de fatores, como a concentração das partículas.

CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 esta espessura mínima que é denominado limite de vazão mínima. Neste trabalho o microescoamento transiente, bifásico líquido – gás de um fluido newtoniano, não-newtoniano e newtoniano com partículas é investigado com a técnica VOF – *Volume Of Fluid*. Para o caso de newtoniano com partículas além do VOF é utilizada a técnica DPM – *Discrete Phase Model*. Ambas disponíveis no *software* Fluent®.

Foram realizados tanto um teste de independência de malha e um teste de independência de geometria. No primeiro para verificar se a quantidade de elementos não interfere na confiabilidade dos resultados numéricos, já no segundo para verificar se as fronteiras do sistema não influenciam na vazão crítica encontrada. A malha grosseira apresentou um resultado diferente em relação a uma malha média e refinada, sendo adotado então a malha média, pois essa acarreta menos esforço computacional em relação a malha refinada. Já o teste de independência de geometria não apresentou diferenças na vazão crítica, sendo então adotado o padrão encontrado na literatura para as dimensões do problema.

De uma forma geral, verifica-se que não é possível diminuir a espessura de filme a valores inferiores de um valor crítico, pois existe um limite físico que controla esta redução. 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 para o caso newtoniano, a espessura mínima de filme depositado no substrato aumenta com o número de capilaridade. Esta tendência é observada para também para os casos com redução do índice de *power law* de $n = 0,8$ e $n = 0,7$. Entretanto, para um valor fixo do número de capilaridade, a espessura mínima de filme diminui com o aumento da importância do comportamento não-newtoniano, resultados estes coerentes com os da literatura.

As recirculações foram observadas quando atendidas duas condições: número de capilaridade baixo em torno de 0,05 e para espessura de filme menor que a terça

parte do espaçamento entre a barra e o substrato.

Tanto a redução do passo de tempo, quanto a alteração de parâmetros numéricos melhoraram a definição do menisco, mas não modificaram o resultado de vazão crítica e conseqüentemente da espessura mínima. Como essas duas mudanças aumentam o tempo de simulação é aconselhável, para um resultado mais rápido, sua utilização após encontrar a vazão crítica do problema estudado.

Uma análise de

No escoamento com partículas tanto o número de Stokes quanto o coeficiente de arrasto foram baixos, e a quantidade de partículas era menor do que 10%, isto é, as partículas são independentes do escoamento, e não interferem no mesmo, então o resultado da espessura mínima foi o mesmo encontrado para o caso com fluido newtoniano, sendo então analisado a concentração dessas partículas. Tem-se que para a vazão crítica do sistema uma concentração de partículas na região de revestimento, e é um problema partículas fiquem retiradas nessa região, ao invés do filme depositado.

Por fim, a viabilidade econômica de implementação de um sistema fotovoltaico residencial foi analisada e publicada como mostra o APÊNDICE C, os detalhes podem ser analisados no APÊNDICE E: GESTÃO FINANCEIRA. O principal resultado dos oito cenários tem-se a necessidade de incentivos do governo, como isenção da cobrança de impostos por um período determinado e quando aplicado seja sobre a diferença entre a energia da rede e a energia elétrica gerada.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se:

- Critério de convergência mais rígido na ordem de 10^{-6} e verificar possíveis alterações na solução;
- Verificar a diferença do uso dos modelos de tensão superficial (CSF e CSS);
- Verificar a diferença da aplicação dos diferentes algoritmos numéricos do Fluent® na simulação;

- Utilizar combinações de fluidos diferente do adotados nesse trabalho (água/gás) para o caso newtoniano e newtoniano com partículas;
- Avaliar outros parâmetros para o modelo de Carreau para escoamento não-newtoniano além do índice de *power-law*;
- Avaliar o desenvolvimento mostrado no APÊNDICE D: FUNÇÃO DEFINIDA PELO USUÁRIO PARA O PERFIL DE VELOCIDADE DESCRITO NA ENTRADA DO ESCOAMENTO;
- Avaliar a geometria completa na simulação como apresentada no desenvolvimento da técnica de revestimento por extrusão;
- Avaliar uma geometria tridimensional da simulação desenvolvida nesse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEGERTER, M. A. **Ink-jet printing**. In AEGERTER, M. A.; MENNIG, M. (Organização). **SOL-GEL technologies for glass producers and users**. SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, 2004.
- AKBARZADEH, V.; HRYMAK, A. N. **Coupled Fluid-Particle Modeling of a Slot Die Coating System**. AIChE Journal, 2016.
- ANDERSON, W., BONHUS, D. L. **An implicit upwind algorithm for computing turbulent flows on unstructured grids**. Computers Fluids vol. 23, 1994.
- ANEEL. **PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 3: Acesso ao Sistema de Distribuição - Seção 3.7: Acesso de micro e minigeração distribuída (Revisão 5 - 14/12/2012)**. Brasília – DF, 2012a.
- ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL número 482**, de 17 de abril de 2012, 2012b.
- ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL número 687**, de 24 de novembro de 2015.
- ANEEL. **Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Brasília - DF, 2014.
- ANSYS. FLUENT HELP GUIDE, v14.5. 2012.
- ARAUJO, S. B. de. **Slot coating of particle suspension**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.
- ASTARITA, G. **Objective and generally applicable criteria for flow classification**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1979.
- BARTH, T. J.; JESPERSEN, D. **The design and application of upwind schemes on unstructured meshes**. Technical Report AIAA-89-0366. AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 1989.
- BENEDITO, R. S. **Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório**. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-graduação em Energia, USP. São Paulo, SP, 2009.
- BERIS, A. N.; GIACOMIN, A. J. **Everything flows**. Applied Rheology, vol. 24, 2014.
- BERNI, A.; MENNIG, M.; SCHMIDT, H. **Doctor blade**. In AEGERTER, M. A.; MENNIG, M. (Organização). **SOL-GEL technologies for glass producers and users**. SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, 2004.
- BHAMIDIPATI, K. L.; DIDARI, S.; BEDELL, P.; HARRIS, T. A.L. **Wetting phenomena**

during processing of high-viscosity shear-thinning fluid. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 166, 2011.

BRASIL. Lei complementar nº 70, de 30 de dezembro de 1991. **Institui contribuição para financiamento da Seguridade Social, eleva a alíquota da contribuição social sobre o lucro das instituições financeiras e dá outras providências.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LCP/Lcp70.htm, acessado em 03/04/2015, 1991.

BRASIL. Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. **Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8987cons.htm, acessado em 03/04/2015, 1995.

BVK – ENERGIA SOLAR. Disponível em: www.bvkenergiasolar.com.br/main.asp?link=noticia&id=14, acessado em 22/06/2015.

CAMPANA, Diego M.; SILVA, Luis D. Valdez; CARVALHO, Marcio S. **Slot Coating Flows of Non-Colloidal Particle Suspensions.** American Institute of Chemical Engineers – AIChE Journal, 2016.

CARREAU, P. J. **Rheological equations from molecular network theories.** Journal of Rheology, 1972.

CARVALHO, M. S.; KHESHGI, H. S. **Low-flow limit in slot coating: theory and experiments.** American Institute of Chemical Engineers – AIChE Journal, v. 1917, n. 46, 2000.

CASAROTTO Filho, N.; KOPITKE, B. H. **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão e estratégia empresarial.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 1994;

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Energia solar fotovoltaica no Brasil: subsídios para tomada de decisão.** Série documentos técnicos, 2010.

CHEW, K. J. **The future of oil: unconventional fossil fuels.** Philosophical transactions of the royal society. Series a, mathematical, physical, and engineering sciences, volume 372, 2014.

COELHO, J. K.; ROMERO, O. J. **Formação e quebra de gotas em uma geometria T-junction.** Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, v. 20, p. 91-104, 2016.

COHEN, D.; SUSZYNSKI, W.; SCRIVEN, L. E. **Flow visualization of two-layer slot coating.** American Institute of Chemical Engineers – AIChE Journal, 1992.

- COHEN, E. D.; GUTTOF, E. B. **Modern Coating and Drying Technology** VCH publishers, New York, USA, 1992.
- COSTA, S. V. **Construção de células solares sensibilizadas por corante a partir de nanoestruturas de ZnO obtidas por método hidrotermal**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do ABC, 2011.
- DE ANDRADE, A. C. **Análise e simulação da distribuição de temperaturas em módulos fotovoltaicos**. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- De LAI, F. C. **Simulação numérica do escoamento particulado para o preenchimento de canal fraturado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2013.
- DURST, F.; HAAS, R.; PERIC, M.; SCHEURER, G. **Computational study of the flow in slot coaters**. American Institute of Chemical Engineers – AIChE Journal, 1988.
- DURST, F.; WAGNER, H. G.. **Slot coating in liquid film coating**. Editora SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V., 1997.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário estatístico de energia elétrica 2016 (ano base 2015)**. Ministério de Minas e Energia – Brasil, 2016.
- EPSVT. **Understanding and Using Pad Printing Inks**. Disponível em: <http://www.epsvt.com/support/generalIssue.cfm?issID=17>. Acesso em 04/09/2016.
- FEJOLI, R. F. **Simulação numérica do escoamento de uma gota de óleo em água através de capilares com gargantas**. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, 2016.
- FERNANDES, J. A. de S. **Análise comparativa dos processos CBD e CSS de crescimento de filmes finos de CdS para fabricação de células solares de CdS/CdTe**. Tese de Doutorado – Instituto Militar de Engenharia, 2009.
- FOX, R. J.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2006.
- GARUZZI, R. P.; ROMERO, O. J. **Aplicação do método volume of fluid na determinação da espessura mínima de filme de revestimento**. Estudos Tecnológicos em Engenharia 11, 2015a.
- GARUZZI, R. P.; ROMERO, O. J. **Redução da espessura de filme na fabricação de células fotovoltaicas**. Ciência & Engenharia 24, 2015b.

- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**, 3.ed. rev. ampl. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.
- GOLDEMBERG, J.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.; LUCCHESI, R. **Oil and natural gas prospects in South America: Can the petroleum industry pave the way for renewables in Brazil?**. Energy policy, edição 64, 2014.
- GREEN, M. A. **Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost**. Progress in photovoltaics, volume 9, edição 2, 2001.
- HANAOR, D.; TRIANNI, G.; SORRELL, C. **Morphology and photocatalytic activity of highly oriented mixed phase titanium dioxide thin film**. Surf. Coat. Tech., 205 (12), 2011.
- HE, Z. **Application of solar heating system for raw petroleum during its piping transport**. Energy procedia, edição 48. 2014.
- HERRMANN, H. J. **The physics of granular media**. Wiley VCH, Weinheim. 2004.
- HIGGINS, B. G.; SCRIVEN, L. E. **Capillary pressure and viscous pressure drop set bounds on coating bead operability**. Chemical Engineering Science, 35: p673-682, 1980.
- HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. **Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries**. J. Comput. Phys., 39(1), 201-225, 1981.
- HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. **Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries**. Journal of Computational Physics, vol. 39, 1981.
- HUSBAND D. M.; MONDY L. A.; GANANI E.; GRAHAM A. L. **Direct measurements of shear-induced particle migration in suspensions of bimodal spheres**. Rheologica Acta volume 33, 1994.
- IDC-ONLINE. **Thick film technology**. Disponível em: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Thick_film_technology.pdf. Acesso em: 04/09/2016.
- IMHOFF, Johninon. **Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2007.
- ISE. **Institute for Solar Energy Systems**. Disponível em: <http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>. Acesso em 28/05/2015.
- KARALIS, D. G; PANTELIS, D. I.; PAPAZOGLU, V. J. **On the investigation of 7075 aluminum alloy welding using concentrated solar energy**. Solar energy materials

and solar cells, volume 86, fascículo 2. 2005.

KAZMERSKI, L. L. **Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview**. Journal of electron spectroscopy and related phenomena, volume 150, 2006.

KAZMERSKI, L. L. **Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview**. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, volume 150, fascículos 2–3, 2006.

KISTLER, S. F.; SCHWEIZER, P. M. **Liquid film coating – Scientific principles and their technological implications**. Editora SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V., 1997.

KISTLER, S. F.; SCRIVEN, L. E. **Coating flows in Computational Analysis of Polymer Processing**. Editora Elsevier, 1983.

KOH, H. J.; KWON, I.; JUNG, H. W.; HYUN, J. C. **Operability window of slot coating using viscocapillary model for Carreau-type coating liquids**. Korea-Australia Rheology Journal, v. 24, n. 2, p. 137-141, 2012.

KREBS, F. C. **Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques**. Solar energy materials & Solar cells, 93, Elsevier, 2009.

LABSOLAR. **Condicionamento da Energia Solar Fotovoltaica para Sistemas Interligados à Rede Elétrica**. Disponível em: <http://www.ufjf.br/labsolar/2011/05/26/condicionamento/>. Acessado em: 23/05/2016.

LANDAU, L.; LEVICH, B. **Dragging of a liquid by a moving plate**. Acta Physicochim, v. 17, n. 42, 1942.

LANDAU, L.; LEVICH, B. **Dragging of a liquid by a moving plate**. Journal Acta Physicochimica USSR 17, 1941.

LEE, K. Y.; LIU, L. D.; LIU, T. J. **Minimum wet thickness in extrusion slot coating**. Chemical Engineering Science, v. 47, n. 7, p. 1703-1713, 1992.

LEIGHTON, D.; ACRIVOS, A. **The shear induced migration of particles in concentrated suspension**. Journal of Fluid Mechanics, volume 181, 1987.

LEONARD, B. P.; MOKHTARI, S. **ULTRA-SHARP nonoscillatory convection schemes for high-speed steady multidimensional flow**. NASATM1-2568 (ICOMP-90-12). NASA Lewis Research Center. 1990.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Editora LTC, 2004.

- MARQUEZAN, L. H. F. **Análise de Investimentos**. Revista Eletrônica de Contabilidade do Curso de Ciências Contábeis, Santa Maria, 2006.
- MARTINS, D. C. **Conversores Estáticos de Potência Utilizados no Processamento da Energia Solar Fotovoltaica**. Conferência Internacional de Aplicações Industriais, vol 2, 2000.
- MIRANDA, G. J. **Be prepared!** IEEE Industry Applications Magazine, 2003.
- MITZI, D. B.; KOSBAR, L. L.; MURRAY, C. E.; COPEL, M.; ATZALI, A. **High mobility ultrathin semiconducting films prepared by spin coating**. Nature, 428, 2004.
- MONTENEGRO, A. A. **Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil**. (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC. Florianópolis, SC, 2013.
- MORAIS, A. F.; SEYBOLD, H.; HERRMANN, H. J.; ANDRADE, J. S., Jr. **Non-newtonian fluid flow through three-dimensional disordered porous media**. Physical Review Letters nº 103, 2009.
- MORAIS, C. L.; ROMERO, O. J.; RIBEIRO, D. C.; PEREIRA, F. A. R. **Influência das forças viscosas e de capilaridade na saturação de óleo residual contido em um capilar com obstruções**. Artigo aceito na revista Petro & Química, 2016.
- MOTTA, R. R. **Engenharia Econômica e Finanças**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2009.
- MUGGERIDGE, A.; COCKIN, A.; WEBB, K.; FRAMPTON, H.; COLLINS, I.; MOULDS, T.; SLINO, P. **Recovery rates, enhanced oil recovery and technological limits**. Philosophical transactions of the royal society. Series a, mathematical, physical, and engineering sciences, volume 372, 2014.
- NAM, J.; CARVALHO, M. **Tracking birth of vortices in two-dimensional flow**. 11th Pan-American Congress of Applied Mechanics – PACAM XI, 2010.
- NANETTI, P. **Coatings from A to Z**. Editora Vincentz Verlag, 2006.
- NEOSOLAR. Disponível em: <http://www.neosolar.com.br/aprenda/perguntas-frequentes#perg03>, acessado em 03/04/2016.
- NEOSOLAR. **Energia solar fotovoltaica**. Disponível em: <http://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica>. Acesso em 19/10/2015.
- OFFERMANS, T.; SCHLEUNIGER, J.; NISATO, G. **Ink-jet printing of polymer solar cells**. Section Polymer Optoelectronics, CSEM Basel, Switzerland, 2010.

- OSHER, S.; SETHIAN, J. A. **Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations**. Journal of Computational Physics, vol. 79, 1988.
- PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. 1st ed. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B. **A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows**. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 5, 1972.
- PENA, M. D.; ROMERO, O. J.; RIBEIRO, D. C. **Mobilização de óleo retido em microcavidades mediante injeção de fluidos não-newtonianos inelásticos**. Latin American Journal of Energy Research – LAJER, 2014.
- PHILLIPS, R. J.; ARMSTRONG, R. C.; BROWN, R. A.; GRAHAM, A. L.; ABBOTT, J. R. **A constitutive equation for concentrated suspensions that accounts for shear-induced particle migration**. Phys Fluids, volume 4, 1992.
- PIETSCH, M.; MENNIG, M. **Pad printing**. In AEGERTER, M. A.; MENNIG, M. (Organização). **SOL-GEL technologies for glass producers and users**. SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, 2004.
- PORTAL SOLAR. **Energia fotovoltaica**. Disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/energia-fotovoltaica.html>. Acesso em 19/10/2015.
- PORTAL SOLAR. **Simulador de custo de sistema de energia solar fotovoltaica**. Disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/calculo-solar>, acessado em 15/06/2015.
- PORTAL-ENERGIA. **Energia solar fotovoltaica**. Disponível em: <http://www.portal-energia.com/energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em 19/10/2015.
- RAZYKOV, T. M.; FERKIDES, C. S.; MOREL, D.; STEFANAKOS, E.; ULLAL, H. S.; UPADHYAYA, H. M. **Solar photovoltaic electricity: current status and future prospects**. Solar Energy, 85, 1580-1608, 2011.
- RCA LABORATORIES. New Jersey. **Thin-film cells trace their root**. Solar cell production global market outlook, business insights, 2001.
- REW – RENEWABLE ENERGY WORLD. **7 reasons thin film is alive and set to win in solar**. Disponível em: <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2014/07/7-reasons-thin-film-is-alive-and-set-to-win-in-solar.html>, acessado em 09/11/2016.
- ROMERO, O. J. **Limite de vazão mínima do processo de revestimento por extrusão de soluções poliméricas**. Tese de doutorado. PUC-RIO, 2003.
- ROMERO, O. J.; CARVALHO, M. S. **Response of slot coating flows to periodic**

- disturbances.** Chemical Engineering Science, v. 63, p. 2161-2173, 2008.
- ROMERO, O. J.; SCRIVEN, L. E.; CARVALHO, M. S. **Effect of curvature of coating die edges on the pinning of contact line.** AIChE Journal, v. 52, p. 447-455, 2006b.
- ROMERO, O. J.; SCRIVEN, L. E.; CARVALHO, M. S. **Slot coating of mildly viscoelastic liquids.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 138, p. 63-75. 2006a.
- ROMERO, O. J.; SUSZYNSKY, W.; SCRIVEN, L. E.; CARVALHO, M. S. **Low-flow limit in slot coating of diluted solutions of high molecular weight polymer.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 118, p. 137-156, 2004.
- ROSE, D. **Microlluidic technologies and instrumentation for printing DNA microarrays, in: Microarray biochip technology,** Eton International, 2000.
- RUSCHAK, K. J. **Limiting flow in a pre-metering coating device.** Chemical Engineering Science, 31: p1057-1060, 1976.
- SAHIMI, M. **Flow and transport in porous media and fractured rock.** Editora VCH, Boston, 1995.
- SANTOS, K. B.; ROMERO, O. J.; MENEGUELO, A. P.; RIBEIRO, D. C. **A numerical investigation of immiscible water-oil displacement in simplified porous media.** Revista IEEE América Latina, v. 14, p. 2175-2183, 2016.
- SARDESHPANDE, V. R.; CHANDAK, A. G.; PILLAI, I. R. **Procedure for thermal performance evaluation of steam generating point-focus solar concentrators.** Solar energy, volume 85. 2011.
- SARTOR, L. **Slot Coating: Fluid Mechanics and Die Design.** Ph D thesis, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA. 1990.
- SAUER, M.; MEILCHEN, S.; KALLEDER, A.; MENNIG, M.; SCHMIDT, H. **Screen printing.** In AEGERTER, M. A.; MENNIG, M. (Organização). **SOL-GEL technologies for glass producers and users.** SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, 2004.
- SCHMITT, M.; BAUNACH, M.; WENGELER, L.; PETERS, K.; JUNGES, P.; SCHARFER, P.; SCHABEL, W. **Slot-die processing of lithium-ion battery electrodes— Coating window characterization.** Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 68, p. 32-37, 2013.
- SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- S-LECFILM. **Soler Film: made possible by multi-layer and fine particle**

- technologies.** Disponível em: <http://www.s-lecfilm.com/eng/product/auto/ssf/index.html>. Acesso em 08/08/2017.
- SOO, S. L. **Particles and continuum: multiphase fluid dynamics.** Revista Hemisphere, New York, 1989.
- STEM, N. **Células solares de silício de alto rendimento: otimizações teóricas e implementações experimentais utilizando processos de baixo custo.** Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia de sistemas eletrônicos, 2007.
- TIMBERLAKE B. D.; MORRIS J. F. **Concentration band dynamics in free-surface Couette flow of a suspension.** Phys Fluids, volume 14, 2002.
- TIRUMKULUDU M.; MILEO A.; ACRIVOS A. **Particle segregation in monodisperse sheared suspension in partially filled rotating horizontal cylinder.** Phys Fluids, volume 12, 2000.
- TIRUMKULUDU M.; TRIPATHI A.; ACRIVOS A. **Particle segregation in monodisperse sheared suspension.** Phys Fluids, volume 11, 1999.
- TROPEA, C.; YARIN, A. L.; FOSS, J. F. **Springer handbook of experimental fluid mechanics.** Editora Springer, 2007.
- TSUO, Y. S.; WANG, T. H.; CISZEK, T. F. **Crystalline-silicon solar cells for the 21st century.** Proceedings of the Electrochemical Society Annual Meeting, 1999.
- TYONA, M. D. **A theoretical study on spin coating technique.** Advances in Materials Research, vol. 2, no 4, 2013.
- UBBINK, O. **Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces.** PhD thesis. Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, England. 1997.
- UMINHO. **Exemplos de células solares.** Universidade de Minho, Portugal. Disponível em: <http://alv.fisica.uminho.pt>. Acesso em 24/07/2014.
- VITORINO, A. R. A. M. **Estudo de técnicas de deposição de filmes finos poliméricos à base de silanos.** Tese (mestrado). Lisboa, 2009.
- XU, S. M.; HUANG, X. D.; DU, R. **An investigation of the solar powered absorption refrigeration system with advanced energy storage technology.** Solar energy, volume 85, 2001.
- YOUNGS, D. L. **Time-dependant multi material flow with large fluid distortion.** Numerical Methods for Fluid Dynamics, Academic, New York, 1982.

APÊNDICE A: ARTIGO PUBLICADO NA ETE (JAN-JUN, 2015)

Estudos Tecnológicos em Engenharia, 11(1):42-53, janeiro-junho 2015
© 2015 by Unisinos - doi:

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
ricardopesotti@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.

APÊNDICE B: ARTIGO PUBLICADO NA CIENG (JUL-DEZ, 2015)

 *Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)*
24 (2): 75 – 84, jul. – dez. 2015

ISSN 1983-4071

REDUÇÃO DA ESPESSURA DE FILME NA FABRICAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

REDUCTION OF THE FILM THICKNESS IN PHOTOVOLTAIC SOLAR CELLS FABRICATION

Oldrich Joel Romero¹, Ricardo Pessoti Garuzzi²

¹Doutor em Engenharia Mecânica, Docente no Programa de Pós Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Câmpus São Mateus, Rodovia BR 101 Norte, km 60, Bairro Litorâneo, CEP 29.932-540, São Mateus, ES, Brasil. E-mail: oldrich.romero@ufes.br.

²Bacharel em Engenharia de Petróleo, Discente do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Câmpus São Mateus. E-mail: ricardopessoti@gmail.com.

RESUMO

A energia solar fotovoltaica é uma alternativa interessante para a geração de energia elétrica, entretanto, ainda é cara se comparada com as fontes tradicionais. Uma forma de aumentar sua competitividade é diminuindo a quantidade de material utilizado. No método de revestimento por extrusão, a diminuição da vazão resulta em camadas cada vez mais finas. Entretanto, a diminuição da espessura encontra limites físicos e operacionais, um deles é o limite de vazão mínima. Este fenômeno verifica-se quando o menisco à jusante invade a separação barra/substrato originando defeitos indesejados, que podem ocorrer para vazões muito baixas ou velocidades do substrato elevadas. Este trabalho apresenta a simulação numérica do processo de revestimento por extrusão de fluidos Newtonianos utilizando a técnica Volume de Fluido (VOF) para determinar o limite de vazão mínima. O domínio de solução das equações 2D se restringe à parte a montante da barra de revestimento. Os resultados mostram que a espessura mínima de filme aumenta com o número de capilaridade, isto significa que, para obter filmes mais finos, a velocidade do processo produtivo deve ser baixa. Além da discussão sobre os limites operacionais é incluída uma revisão bibliográfica referente ao petróleo, células fotovoltaicas e métodos de revestimento.

Palavras-chave: Escoamento bifásico, Limite de vazão mínima, Revestimento por extrusão, Volume de fluido.

ABSTRACT

Photovoltaic solar cells are an attractive option to electric energy generation, but is still expensive if compared with traditional sources. One way to reduce the cost of solar cells is to use a thinner coating thickness. In the slot coating process, lower flow rates results in lower film thickness. However, there are physical and operational limits related with the method. One of them is the low-flow limit. This phenomena is observed at low film thickness, the downstream meniscus invades the gap between downstream slot die lip and the substrate creating a permanent and undesirable defect in the substrate. 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 solution domain of the 2D governing equations is restricted to the downstream section of the slot coating die. It is verified that the minimal wet coating thickness increase with the capillary number, which means that thinner films will be obtained at lower substrate velocity. Further on the discussion about operational limits, highlighting the low flow limit, it is included a bibliographic revision about the oil production, photovoltaic solar cells and coating methods.

Keywords: Two-phase flow, Low-flow limit, Slot coating, Volume of Fluid.

1 – INTRODUÇÃO

O petróleo responde por mais de um terço da oferta global de energia primária e mais de 95% da energia utilizada nos transportes. Possui uma combinação inigualável de grande quantidade de energia por unidade de massa e por unidade de volume e, ao mesmo tempo, é facilmente transportável (FREEDMAN, 2014). Estas características resultam em um consumo crescente e, portanto, aumentar sua oferta tem sido uma preocupação recorrente, principalmente nos últimos 50 anos. Entretanto, embora existam reservas gigantescas, a quantidade de petróleo que pode ser extraído do subsolo é limitada, e o pico de produção global de petróleo deve ser atingido, a partir do qual a produção começaria a declinar (MILLER; SORRELL, 2014; HOOK *et al.*, 2014).

A maior parte dos campos gigantes já está em produção (MILLER; SORRELL, 2014) e as descobertas recentes, com exceção das reservas do pré-sal brasileiro (RICCOMINI; SANT'ANNA; TASSINARI, 2012; CARTA CAPITAL, 2016; PETROBRAS, 2016), são de campos menores e se encontram em locais de difícil acesso exigindo, portanto, tecnologias cada vez mais sofisticadas para viabilizar seu desenvolvimento. (MILLER; SORRELL, 2014). Adicionalmente, 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; MURPHY, 2014). Embora esforços estejam sendo conduzidos para viabilizar a exploração de fontes energéticas não convencionais (CHEW, 2014) a transição para formas de energia de baixo carbono é uma necessidade que deve ser atendida num futuro próximo. Esta transição que tem

APÊNDICE C: ARTIGO PUBLICADO NA ESPACIOS NO V38 N1

Revista ESPACIOS | Vol. 38 (Nº 01) Año 2017

<http://www.revistaespacios.com/a17v38n01/17380123.html>

HOME Revista ESPACIOS ▼ ÍNDICES ▼ A LOS AUTORES ▼

Vol. 38 (Nº 01) Año 2017. Pág. 23

Viabilidade econômica da implementação de células fotovoltaicas em residências do Espírito Santo, Brasil

Economic feasibility of implementation of photovoltaic cells in residences of Espírito Santo, Brazil

Ricardo Pessoti GARUZZI 1; Oldrich Joel ROMERO 2

Recibido: 08/08/16 • Aprobado: 16/09/2016

Conteúdo

1. Introdução
 2. Aspectos teóricos
 3. Metodologia
 4. Resultados e discussões
 5. Conclusões
- Referências bibliográficas

RESUMO:

A energia solar é uma opção atrativa e ambientalmente limpa para a geração de energia elétrica. Entretanto seu uso residencial de forma mais intensa depende de diversos fatores. Dentre elas, para um usuário a perspectiva econômica é determinante. Desse modo, o objetivo desse trabalho é mostrar a viabilidade econômica de implementação de um sistema fotovoltaico residencial através da análise do Valor Presente Líquido (VPL). Embora o estudo utilize dados de consumo elétrico da cidade de São Mateus, Espírito Santo, Brasil, a metodologia pode ser aplicada para diversos outros centros urbanos. Como principais resultados dos oito cenários simulados ao longo de 25 anos, tem-se que a realidade atual, com elevados impostos e/ou com abundância de chuvas, que resulta em geração hidrelétrica barata, não motiva ao usuário para investir na implementação do sistema fotovoltaico residencial. Esta opção, que tem mínimo impacto ambiental, tornaria atrativo com (i) incentivos do governo (como isenção da cobrança de impostos por um período determinado e quando aplicado seja sobre a diferença entre a energia da rede e a energia elétrica gerada); e/ou (ii) quando aplicado o sistema de tarifação com bandeira vermelha, vigente durante escassez de chuvas, tal que a continuidade do funcionamento das hidrelétricas fica comprometida.

Palavras-chave: energia elétrica; energia solar; célula fotovoltaica; VPL; payback; incentivos governamentais; bandeiras tarifárias.

ABSTRACT:

Solar energy is an attractive and environmental clean source to generate electric energy. However, its domestic and intense use is function of several factors, from which the economic issue is the more important. Thus, the goal of this work is to show the economic viability of implementation of a residential photovoltaic solar cell system through a Net Present Value tool. Though data from São Mateus - ES, Brazil, are used, the methodology could be generalized to other cities. Main results from eight simulated scenarios along 25 years, reveals that actual conditions are unfavorable to users who have the intention to implement solar systems technology in their residences. It will become attractive with: (i) governments incentives (as for example, without tax for a period of time, in this work is five years, and when applied it will be over the difference between public electric energy and generated electric energy); and/or (ii) system of tariffs flags, applied during periods of reduced rains, as a consequence the continuity of hydroelectric plants is not guaranteed.

Keywords: electric energy; solar energy; photovoltaic solar cell; net present value; payback; government incentives; tariff flags.

1. Introdução

O petróleo responde por mais de um terço da oferta global de energia primária e mais de 95% da energia utilizada nos transportes. Isso é devido a sua combinação inigualável de grande quantidade de energia por unidade de massa e por unidade de volume, e ao mesmo tempo por ser facilmente transportável. Estas características resultam em um consumo crescente e, portanto, aumentar sua oferta tem sido uma preocupação recorrente, principalmente nos últimos 50 anos. Entretanto a quantidade de petróleo é limitada, e o pico de produção global de petróleo deve ser atingido, a partir do qual a produção começa a declinar (MILLER e STEVEN, 2014).

A oferta futura de petróleo é um tema complexo e com múltiplas variáveis influenciando e variando as oportunidades de mitigação, mas um consenso entre vários pesquisadores (Höök et al., 2014; Timilsina, 2014; Muggenridge et al., 2014; Chew, 2014) é que os recursos petrolíferos convencionais estão em um estágio avançado de esgotamento e que os combustíveis líquidos vão se tornar cada vez mais escassos, exigindo assim novas formas de energia e novas tecnologias.

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, cozinhar alimentos, aquecimento de água, refrigeração solar (Xu et al., 2011), secagem de materiais diversos, além uma variedade de usos comerciais e industriais, como 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).

Esta energia pode ser utilizada de duas maneiras diferentes, na forma de energia térmica mediante coletores e receptores solares (Sardeshpande et al., 2011), e na forma de energia solar fotovoltaica em que materiais, como o silício, de características específicas convertem a energia solar em corrente contínua, que pode ser convertida em corrente alternada ou armazenada para ser utilizada posteriormente (Kazmerski, 2006).

O uso da energia solar fotovoltaica tem destaque nos países europeus (Figura 1), os quais tem contribuído com 58% da instalação global até 2013. Isto é resultado dos incentivos a esta tecnologia proporcionados pelos governos, mesmo que, em comparação com outros países, como o Brasil, o potencial do recurso não seja alto.

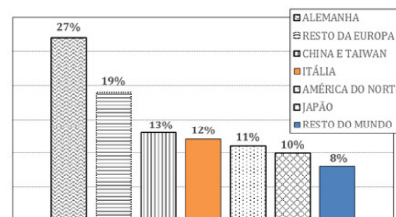


Figura 1. Instalação fotovoltaica global acumulada até 2013. Fonte: adaptado de ISE (2015).

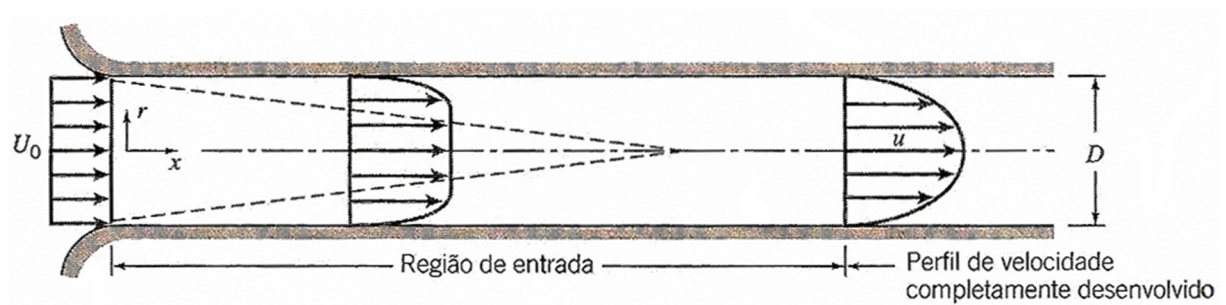
De acordo com Razykov et al. (2011) a produção de células fotovoltaicas (PV - *photovoltaic solar cells*) tem aumentado consideravelmente com taxas de 30% a 40% a partir do ano 2000 (Figura 2), sendo os principais mercados USA, Japão e a União Europeia.

APÊNDICE D: FUNÇÃO DEFINIDA PELO USUÁRIO PARA O PERFIL DE VELOCIDADE DESCRITO NA ENTRADA DO ESCOAMENTO

A função definida pelo usuário (*User-Defined Function – UDF*) é uma forma que o usuário pode escrever em linguagem de programação C para ser carregado dinamicamente, para melhorar as características do código padrão do *solver* do FLUENT (ANSYS, 2012).

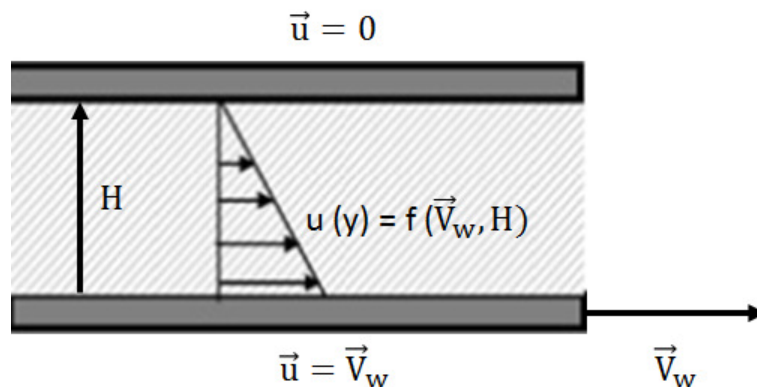
O perfil de velocidade, \vec{u} , será alterado na entrada do escoamento de um perfil de velocidade constante (que se transforma em um perfil completamente desenvolvido) na região de entrada (**Figura 1**) para um perfil em que a placa inferior está se movendo com velocidade constante (**Figura 2**).

Figura 1: Escoamento na região de entrada de um tubo.



Fonte: Fox e McDonald (2006).

Figura 2: Escoamento na região de entrada de um tubo, com placa inferior se movendo com velocidade constante.



Fonte: Fox e McDonald (2006) (modificado).

Para isso será utilizado um perfil de velocidade do tipo Couette-Poiseuille, mostrado por Romero, Scriven e Carvalho (2006b) como sendo

$$\vec{u} = \frac{-6V_w t}{H} \left[\left(-1 + \frac{1H}{2t} \right) \left(\frac{y}{H} \right)^2 + \left(1 - \frac{2H}{3t} \right) \left(\frac{y}{H} \right) + V_w \right] \quad (1)$$

Na equação **(1)**, a espessura mínima, t , é um dado de entrada, juntamente com a separação barra/substrato, H ; velocidade do substrato, V_w e coordenada vertical, y . Mas, no problema estudo a espessura mínima é uma saída do problema. Desse modo será adotado que

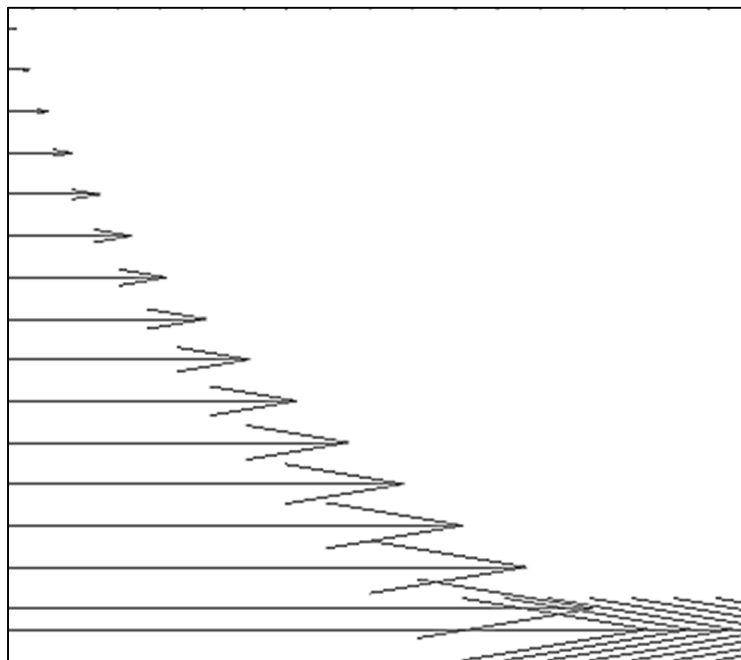
$$q = \frac{Q}{b} = V_w t \quad (2)$$

em que q é a vazão volumétrica, Q , por unidade de profundidade, b . Aplicando a equação **(2)** em **(1)**, tem-se a expressão:

$$\vec{u} = \left(\frac{-6q}{H^3} + \frac{3V_w}{H^2} \right) y^2 + \left(\frac{6q}{H^2} - \frac{4V_w}{H} \right) y + V_w \quad (3)$$

O perfil do vetor velocidade do tipo Couette-Poiseuille utilizando a UDF apresentada na equação **(3)** é apresentado na **Figura 3**.

Figura 3: Perfil vetor velocidade da UDF do tipo Couette-Poiseuille.



APÊNDICE E: GESTÃO FINANCEIRA

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, a 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 do país possuir uma posição geográfica privilegiada que permite acesso à energia solar praticamente o ano inteiro, também dispõe da matéria prima essencial para a 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. Neste contexto, será mostrado a viabilidade econômica de implementação de um sistema fotovoltaico residencial através da análise do Valor Presente Líquido (VPL), utilizando como cenários as atuais políticas do Brasil, e posteriormente, um percentual de redução do custo das células fotovoltaicas, ou seja, uma redução de preço através do desenvolvimento técnico do processo de fabricação, como o presente trabalho apresentou, esse estudo, teve um artigo aceito na Revista Espacios que será publicado em dezembro de 2016.

i. Custo da energia elétrica no Brasil

O custo da geração de energia elétrica mediante células solares é ainda relativamente elevado quando comparado com outras formas mais estabelecidas de produção de energia elétrica como a hidrogeração e a termogeração.

A geração de energia elétrica de pequeno porte, no Brasil, é parametrizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através da Resolução Normativa número 482, de 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012a, 2012b), atualizada para Resolução Normativa número 687, de 24 de novembro de 2015 (ANEEL, 2015), como sendo microgeração (até 100 kW) e a minigeração (100 kW a 1 MW).

A referida resolução regulamenta, também, a instalação de pequenos geradores residenciais, destacando que o consumidor será responsável pelos custos de adequação do sistema de medição necessário para implantar o sistema de

compensação. Após a adaptação, a própria distribuidora será responsável pela manutenção, incluindo os custos de eventual substituição.

A ANEEL deve garantir aos consumidores o pagamento de uma tarifa justa pela energia fornecida e, ao mesmo tempo, preservar o equilíbrio econômico-financeiro das concessionárias, para que possam prestar um serviço com a qualidade e a continuidade pactuadas.

A cobrança da energia elétrica residencial é efetivada, segundo a ANEEL, é composta da tarifação, impostos e bandeiras tarifárias.

a. Tarifação

A Lei nº 8987/1995 (BRASIL, 1995) iniciou a regulação das tarifas por incentivos, tal que as distribuidoras se tornem mais eficientes. Segundo Montenegro (2013), as revisões tarifárias passaram, então, a considerar as características de cada área de concessão, tais como o número de consumidores, a densidade do mercado (quantidade de energia distribuída a partir de uma determinada infraestrutura), os quilômetros da rede de distribuição de cada empresa e o custo da energia comprada pelas distribuidoras. Além da tarifa, os impostos e as taxas de iluminação pública também não são iguais em todos os estados e municípios, não sendo competência da ANEEL defini-los.

As fórmulas de reajuste e revisão tarifária estão previstos em contratos de concessão e não acompanham diretamente a inflação e nem o reajuste do salário mínimo. No reajuste anual da tarifa de energia, apenas uma parte dos custos da distribuidora é corrigida pelo Índice Geral de Preços de Mercado (IGPM), subtraído o Fator X (que estima ganhos de produtividade a serem revertidos à modicidade tarifária). Os demais custos, como o da compra de energia, são repassados conforme dispositivos específicos de contratos ou de regulamentos.

b. Impostos

Os impostos incidentes sobre a taxa de consumo final do cliente que atualmente são cobrados pelo governo são:

- PIS/PASEP – Programas de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público, tem como finalidade o financiamento do programa do Seguro-Desemprego e o abono aos empregados que recebem até dois salários mínimos mensais;
- COFINS – Contribuição Social para Financiamento da Seguridade Social, foi instituída pela Lei Complementar nº 70/1991 (BRASIL, 1991), destinada a financiar as despesas das áreas de Saúde, previdência e assistência social; e
- ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços, surgiu na constituição federal de 1988 pela fusão do ICM (circulação de mercadorias) com os impostos únicos federais sobre minerais, combustíveis, energia elétrica, transporte e comunicação.

O PIS/PASEP e o COFINS são legislados pelo Ministério da Fazenda. Estes tributos federais estavam embutidos na tarifa de energia elétrica com alíquotas fixas PIS 1,65% e COFINS 7,6%, acompanhado o reajuste das tarifas.

A Resolução Homologatória nº 162 de 01/08/2005 alterou a sistemática de repasse do PIS/PASEP e COFINS ao consumidor, determinando a exclusão dos mencionados tributos da tarifa, de maneira que as empresas de distribuição devem calcular a alíquota e cobrá-la, demonstrando separadamente na conta de energia elétrica do consumidor.

Tratam-se de tributos que sempre foram cobrados pelo Governo integrando a tarifa de cada concessionária. Agora são discriminados na conta de energia.

c. Sistema de bandeiras tarifárias

Como informado pela ANEEL, a partir de 2015 as contas de energia incorporaram o Sistema de Bandeiras Tarifárias.

O sistema possui três categorias de custos identificados pelas cores verde, amarela e vermelha, as quais indicam o seguinte:

- Bandeira verde: condições favoráveis de geração de energia. A tarifa não sofre nenhum acréscimo;
- Bandeira amarela: condições de geração menos favoráveis. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,025 para cada quilowatt-hora (kWh) consumidos; e

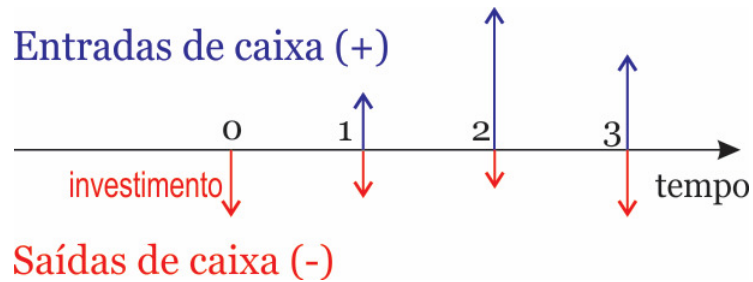
- Bandeira vermelha: condições mais custosas de geração. A tarifa sobre acréscimo de R\$ 0,055 para cada quilowatt-hora kWh consumidos.

O sistema de bandeiras é aplicado por todas as concessionárias conectadas ao Sistema Interligado Nacional - SIN. A partir de 1º de julho de 2015, o sistema de bandeiras é aplicado também pelas permissionárias de distribuição de energia.

ii. Fluxo de caixa

A visualização de um problema envolvendo investimento, receitas e custos que ocorrem em diferentes instantes de tempo, é facilitada utilizando uma representação gráfica simples chamada de diagrama de fluxo de caixa, como mostra a **Figura 1**.

Figura 1: Esquema simplificado de um fluxo de caixa.



As receitas que determinado investimento proporciona são valores positivos, já os custos são valores negativos. O investimento é um custo lançado no momento zero. Após a montagem desse fluxo de caixa, FC na equação (1), é possível abordar métodos para avaliar alguns parâmetros econométricos, que no caso de estudo será o valor presente líquido para análise do retorno sobre a instalação do sistema fotovoltaico nas residências.

iii. Taxa mínima de atratividade (TMA)

O requisito básico de um projeto de investimento é a geração de retorno econômico, e que este compense o custo de capital e os riscos envolvidos no investimento. Para tanto, os métodos de análises de investimentos geralmente levam em consideração uma taxa de desconto, mais conhecida como Taxa Mínima de

Atratividade (TMA), serve para a comparação e ou análise deste retorno.

Conforme CASAROTTO e KOPITKE (1994), a TMA representa a taxa atrativa que os investidores esperam obter de um projeto e que seja equivalente à rentabilidade de outras aplicações realizadas e de pouco risco. Em outras palavras, é uma taxa de juros que representa o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento.

iv. Valor presente líquido (VPL)

A análise de viabilidade econômica busca identificar quais são os benefícios de um dado investimento a fim de proceder com sua implementação. CASAROTTO e KOPITKE (1994) explicam que a decisão da implementação de um projeto deve considerar critérios econômicos (rentabilidade do investimento), critérios financeiros (disponibilidade de recursos) e critérios imponderáveis, que são fatores não conversíveis em dinheiro, como boa vontade de um fornecedor. Dentre os vários métodos utilizados para análise de viabilidade de projetos, é utilizado o Método do Valor Presente Líquido (VPL).

Valor Presente Líquido (VPL), na concepção de MARQUEZAN (2006), consiste em um somatório algébrico de fluxo de caixa, em relação ao saldo das entradas e saídas, futuro descontado do investimento inicial. Todos esses valores são atualizados, utilizando uma taxa de juros compostos (TMA), para uma data presente. Desse modo, todo o fluxo de caixa futuro é mostrado em valores atuais. Esse cálculo pode ser obtido através da equação (1):

$$VPL_i = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - I_0 \quad (1)$$

Da equação tem-se que VPL_i é o valor presente líquido descontado a uma taxa i ; FC_j é o fluxo de caixa com j indicando o período de tempo que varia de 1 até n meses; e I_0 é o investimento inicial.

Um projeto é aceito se o VPL é positivo, ou seja, a somatória dos fluxos futuros

descontados a uma taxa é maior que o investimento inicial. Se o VPL é negativo, ou seja, a somatória dos fluxos futuros descontados a uma taxa é menor que o investimento inicial, rejeita-se o projeto. Se o VPL é zero, ou seja, a somatória dos fluxos futuros descontados a uma taxa é igual ao investimento inicial, o investimento é indiferente. Se a análise for entre uma carteira de possibilidades de investimentos, o melhor é aquele que apresenta o maior VPL.

v. Payback

Denomina-se *payback* ao tempo em que um investimento será pago, ou seja, o período necessário para recuperar o custo inicial do projeto ou o tempo para zerar seu fluxo de caixa acumulado (MOTTA, 2009).

vi. Custo de disponibilidade

Para unidades consumidoras conectadas em baixa tensão (grupo B), existe um custo de disponibilidade. É um valor em reais equivalente a 30 kWh (monofásico), 50 kWh (bifásico) ou 100 kWh (trifásico), que é cobrado independente do ser consumido ou não pelo cliente.

De forma análoga, para os consumidores conectados em alta tensão (grupo A) será devida apenas a parcela da fatura correspondente à demanda contratada.

vii. Metodologia

As informações necessárias para o computo do fluxo de caixa e, conseqüentemente, a análise de viabilidade econômica da instalação de um sistema fotovoltaico residencial, são divididos em três grupos: investimento, custos e receitas. Oito cenários são simulados para a análise de retorno financeiro, identificando aquele que é mais favorável para iniciar a implementação do sistema fotovoltaico residencial.

a. Dados necessários

Investimento

Considera-se que o consumo líquido mínimo, que é a diferença entre a energia consumida e a energia gerada pelo sistema, é igual ao custo de disponibilidade. Com este critério as perdas econômicas são menores.

Em 2015 o consumo médio mensal residencial no Espírito Santo foi de 167,4 kWh (EPE, 2015). Assim será considerada uma demanda de 180 kWh/mês, uma vez que o aumento de consumo de energia elétrica residencial no estado está em 3% (EPE, 2015). A análise considera o uso de um sistema trifásico devido à maior possibilidade de instalação do sistema solar, e para este sistema o consumidor é obrigado a pagar o custo de disponibilidade de 100 kWh/mês.

Nesse estudo o sistema solar deve gerar 80 kWh/mensal (180 kWh/mês - 100 kWh/mês) e de acordo com PORTAL SOLAR (2015) a potência recomendada para esse valor é de 0,61 kWp, que gera entre 80 – 85 kWh/mês. O sufixo p, significa pico, e kWp representa a unidade de medida utilizada para painéis fotovoltaicos e significa a potência em kW fornecida por um painel em condições específicas e reproduzidas em laboratório, ou seja, a potência máxima que um painel pode fornecer em condições ideais (NEOSOLAR, 2016).

Para gerar os 0,61 kWp de energia por mês o custo do sistema de geração é de aproximadamente R\$ 6.200 (PORTAL SOLAR, 2015). Nesse valor já está calculada a estimativa para instalação, frete do transporte, etc.

Além do valor do equipamento, o consumidor que decidir instalar um sistema fotovoltaico em sua residência terá que arcar também com custos referentes à compra do medidor de energia bidirecional de dois quadrantes, que permite a medição da energia elétrica tanto injetada na rede quanto a consumida, e do dispositivo de seccionamento visível (DSV), (ANEEL, 2012a).

Pesquisa realizada por Montenegro (2013) nas concessionárias CELESC e CEMIG referente ao custo destes dispositivos, mostram que o valor médio é de R\$1.000, o qual é adotado neste trabalho.

Custos

Os fatores que interferem nos custos são basicamente a tarifa paga por cada kWh consumido e os impostos que incidem sobre o consumo. Em relação ao consumo, é considerado uma instalação trifásica, por permitir uma análise mais

conservativa, já que tal escolha incorre em um custo de disponibilidade maior a pagar mensalmente (100 kWh).

Como o estudo é direcionado para cidade de São Mateus – ES, Brasil, são utilizados dados de Montenegro (2013) para o estado do Espírito Santo, e uma conta de energia fornecida por um consumidor da cidade. Assim, tem-se que o consumo médio mensal residencial típico é 180 kWh.

Os impostos considerados sobre o valor da tarifa são o imposto estadual ICMS e as contribuições federais PIS e COFINS. Após a inclusão desses impostos tem-se a tarifa final de energia elétrica cobrada ao consumidor residencial que se enquadra na classe B1.

Como esses impostos estão discriminados na conta de energia, é possível saber o valor que a companhia elétrica (que para o Espírito Santo é a EDP - Energias de Portugal S.A.) cobra de seus usuários. Desta forma os impostos para o mês de maio de 2015 (data inicial do estudo) são, ICMS 25%, PIS 1,65% e COFINS 7,6%, somando um total de 34,25% em impostos.

Esses valores podem variar mensalmente ou anualmente de acordo com a necessidade do governo, porém para este estudo os impostos são considerados constantes ao longo dos 25 anos de vida útil do sistema fotovoltaico, o que de acordo com Montenegro (2013) é uma consideração plausível.

Em relação à tarifação da energia, o valor para o município de São Mateus – ES, é de 0,3666 R\$/kWh. Para a tarifação da energia será considerada também a análise para as bandeiras vermelha e verde além de um reajuste de 4,5% a.a.

Outro fator que afeta nos custos é a manutenção do sistema. Para as despesas anuais com Operação e Manutenção (O&M), considera-se 1% ao ano sobre o valor total do sistema (desconsiderando os custos com medidor de energia e DSV), gerando um valor de R\$ 6,00 mensais.

Este recurso permitiria uma troca de inversor ao longo da vida útil do sistema e despesas de O&M para um sistema fotovoltaico de pequeno porte.

Resumindo, as considerações que foram feitas para os custos no fluxo de caixa deste estudo são:

- Consumo médio mensal: 180 kWh/mês;
- Custo disponibilidade: 100 kWh/mês (trifásico);
- Total em impostos: 34,25 %;
- Tarifa de energia: 0,3666 R\$/kWh;

- Bandeira verde: sem acréscimo na tarifa;
- Bandeira vermelha: com acréscimo de 0,055 R\$/kWh;
- Reajuste anual tarifário: 4,5%;
- Operação e manutenção: 6,00 R\$/mês.

Receitas

Os dois fatores que afetam o fluxo de caixa são a geração de energia do sistema fotovoltaico, e a redução de eficiência do sistema fotovoltaico.

A geração considerada do sistema fotovoltaico é de 85 kWh/mês. Entretanto, para efeito de cálculo de geração solar será considerado apenas 80 kWh/mês, pois não existe bateria no sistema para reservar essa energia extra, e o sistema compensação proposto pela ANEEL (2014), ainda não é satisfatoriamente aplicável, pois não é uma lei sobre o assunto, apenas uma cartilha deixando a opção para as concessionárias adotarem ou não.

Como custo de disponibilidade adotado foi o de 100 kWh/mês e o consumo total residencial é de 180 kWh/mês o saldo líquido será de 100 kWh/mês (180 kWh/mês menos 80 kWh/mês).

A queda de desempenho do sistema fotovoltaico é de 0,5% ao ano (BENEDITO, 2009). Resumindo, as receitas que foram consideradas para o fluxo de caixa são:

- Geração fotovoltaica: 85 kWh/mês;
- Queda de desempenho anual: 0,5%.

b. Cenários considerados para análise do retorno financeiro

Com base nas informações apresentadas, é possível fazer uma análise do retorno financeiro ao longo de 25 anos, e para tal foram definidos os seguintes cenários:

- Cenário 1. Os impostos incidem sobre o valor total da energia elétrica consumida, e não sobre o saldo líquido da diferença entre a gerada e a consumida. Será considerado bandeira vermelha;

- Cenário 2. Os impostos incidem sobre o valor total da energia elétrica consumida, e não sobre o saldo líquido da diferença entre a gerada e a consumida. Será considerado bandeira verde;
- Cenário 3. Os impostos incidem sobre a diferença entre a energia consumida e a energia solar gerada. Será considerada bandeira vermelha;
- Cenário 4. Os impostos incidem sobre a diferença entre a energia consumida e a energia solar gerada. Será considerada bandeira verde;
- Cenário 5. Como forma de incentivo os cinco primeiros anos do ICMS não é cobrado do consumidor, após esse tempo os impostos serão incididos sobre o consumo total do usuário. Será considerada bandeira vermelha;
- Cenário 6. Como forma de incentivo os cinco primeiros anos do ICMS não é cobrado do consumidor, após esse tempo os impostos serão incididos sobre o consumo total do usuário. Será considerada bandeira verde;
- Cenário 7. Como forma de incentivo os cinco primeiros anos do ICMS não é cobrado do consumidor, após esse tempo os impostos serão incididos sobre a diferença entre a energia consumida e a energia solar gerada. Será considerada bandeira vermelha;
- Cenário 8. Como forma de incentivo os cinco primeiros anos do ICMS não é cobrado do consumidor, após esse tempo os impostos serão incididos sobre a diferença entre a energia consumida e a energia solar gerada. Será considerada bandeira verde.
- Cenário 9. Os impostos incidem sobre o valor total da energia elétrica consumida, e não sobre o saldo líquido da diferença entre a gerada e a consumida. Será considerado bandeira vermelha e uma redução no custo de 15% do sistema solar, uma vez que segundo REW (2016) o sistema fotovoltaico de filmes finos é 10 vezes mais barato quando comparados aos convencionais;
- Cenário 10. Os impostos incidem sobre o valor total da energia elétrica consumida, e não sobre o saldo líquido da diferença entre a gerada e a consumida. Será considerado bandeira verde e uma redução no custo de 15% do sistema solar, uma vez que segundo REW (2016) o sistema fotovoltaico de filmes finos é 10 vezes mais barato quando comparados aos convencionais.

Esses cenários são mostrados de forma resumida na **Tabela 1**.

Tabela 1: Condições dos diferentes cenários traçados para 25 anos de vida útil.

Cenário	Imposto	Bandeira	Isenção do ICMS	Redução do preço
1	Total consumido	Vermelha	Não	Não
2	Total consumido	Verde	Não	Não
3	Saldo líquido	Vermelha	Não	Não
4	Saldo líquido	Verde	Não	Não
5	Total consumido	Vermelha	Sim: os 5 primeiros anos	Não
6	Total consumido	Verde	Sim: os 5 primeiros anos	Não
7	Saldo líquido	Vermelha	Sim: os 5 primeiros anos	Não
8	Saldo líquido	Verde	Sim: os 5 primeiros anos	Não
9	Total consumido	Vermelha	Não	15%
10	Total consumido	Verde	Não	15%

c. Exemplo de cálculo para os dois primeiros meses

Para a análise de retorno do investimento do sistema fotovoltaico residencial é utilizada a análise de VPL ao longo de 25 anos (300 meses), que é a vida útil média do equipamento de geração. Para a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), utiliza-se a caderneta de poupança como base, desse modo considerou-se juros de 7,0 % ao ano, ou 0,58 % ao mês. A vantagem da caderneta é a liquidez diária, a isenção dos impostos de renda (IR) sobre operações financeiras (IOF), a ausência de taxas por parte dos bancos e a liberdade de poder retirar o dinheiro a qualquer momento.

Para um tempo de 300 meses (25 anos) e uma TMA de 0,58% ao mês ($i = 0,0058$), o investimento inicial é de $I_0 = R\$ 7.200,00$. Ainda uma simples análise de *payback* é possível com o resultado do VPL, obtendo-se assim o tempo de retorno que o sistema fotovoltaico iria começar a gerar economia para o usuário.

É exemplificado o cálculo do VPL para os dois primeiros meses dos 300 que formam o período total do cenário 7. A expressão do VPL, equação (1) $VPL_i = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - I_0$, particularizado para o primeiro mês, janeiro de 2015 ($n = 1$), é $VPL_{0,0058} = \frac{FC_1}{(1+0,0058)^1} - 7.200$, sendo o fluxo de caixa (FC_1) obtido como $FC_1 = A_1 - B_1$. Em que A_1 representa o preço da energia elétrica com impostos e sem utilizar energia solar, e B_1 representa esse valor quando se utiliza energia solar e outros

encargos.

O valor da energia sem impostos é calculado multiplicando a tarifa total (incluindo o efeito da bandeira tarifária) pelo consumo em kWh. Para o cenário 7 a tarifa sem bandeira é 0,3666 R\$/kWh, e com efeito da bandeira (vermelha) é 0,0550 R\$/kWh, totalizando 0,4216 R\$/kWh. Como o consumo de energia mensal é de 180 kWh o preço sem imposto resulta 75,89 R\$/mês. Desse modo para o termo A_1 tem-se $A_1 = \frac{\text{consumo sem impostos}}{[1-(\text{PIS}+\text{COFINS}+\text{ICMS})]} = \frac{75,89}{[1-(0,0165+0,076+0,25)]} = \text{R\$ } 115,42$. O termo B_1 inclui o valor de manutenção do sistema de 6 R\$/mês, e o valor com imposto sobre a disponibilidade de 100 kWh que gera um custo de 42,16 R\$/mês. O valor com PIS e COFINS e com isenção de ICMS, tem-se $B_1 = 6 + \frac{42,16}{[1-(0,0165+0,076+0,00)]} = \text{R\$ } 52,46$. Com isso o fluxo de caixa é $FC_1 = 62,96 \text{ R\$/mês}$.

Com isso o valor presente líquido (1 mês depois de iniciado o projeto) é $VPL_{0,0058} = \frac{\text{R\$ } 62,96}{(1+0,0058)^1} - \text{R\$ } 7.200 = \text{R\$ } 62,5969 - \text{R\$ } 7.200 = -\text{R\$ } 7.137,40$.

Esse valor é utilizado como investimento inicial (I_0) para o mês de fevereiro de 2015 ($n = 2$), sendo $VPL_{0,0058} = \frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} - I_0$. O termo FC_2 é $FC_2 = A_2 - B_2$. Considerando que o consumo e os impostos são constantes tem-se que $A_2 = A_1$ e $B_2 = B_1$, desta forma $FC_2 = \text{R\$ } 62,96$, com isso o VPL para o segundo mês é $VPL_{0,0058} = \frac{\text{R\$ } 62,96}{(1+0,0058)^1} + \frac{\text{R\$ } 62,96}{(1+0,0058)^2} - \text{R\$ } 7.200,00 = -\text{R\$ } 7.075,16$, este valor é o novo I_0 para o próximo mês, assim sucessivamente. O resultado deste processo para os 300 meses (25 anos) é apresentado na próxima seção.

viii. Resultados e discussões

Neste trabalho são abordados dez cenários que procuram reproduzir as condições reais vivenciadas pelos moradores da cidade de São Mateus – ES, Brasil e situações que incorporem sugestões para uma melhora na política de incentivo do que vem sendo adotada.

O procedimento detalhado na seção vii.c desse capítulo, é generalizado para cada um dos oito cenários ao longo de 25 anos, iniciando em janeiro de 2015. Duas figuras são geradas para auxiliar na análise dos resultados. A **Figura 2** apresenta o comportamento do VPL para cada cenário e para diversos instantes de tempo.

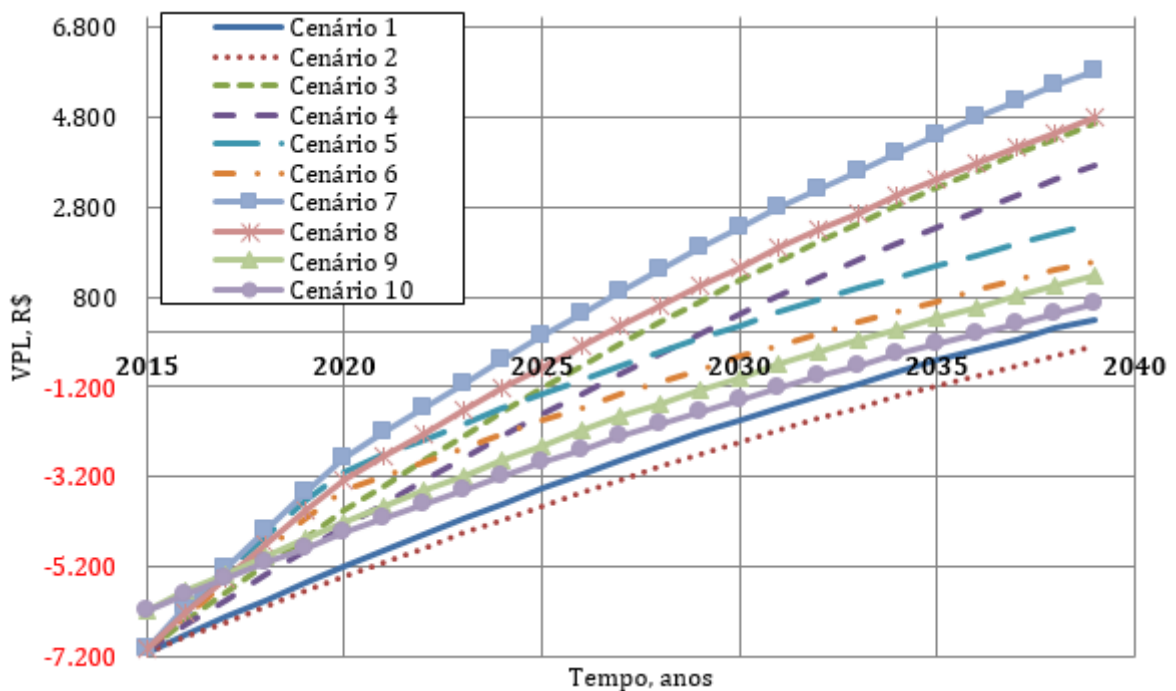
Embora a abcissa apresente o tempo em anos, o cálculo via equação (1) é mensal. De um modo geral o VPL, no início, é negativo para todos os casos, aumenta com o tempo tornando-se positivo em instantes de tempos diferentes.

O investimento se torna viável apenas quando o VPL começa a ficar positivo, ou seja, atingir o valor zero está associado com o melhor retorno do cenário considerado.

O único cenário que não ocorre retorno é o segundo, pelo fato dos impostos serem cobrados em cima do consumo total, não sobre o saldo gerado entre o consumido pela residência e gerado pelo sistema, e a bandeira verde não acrescentar custos na tarifa faz com que seja mais vantajoso ao consumidor comprar energia fornecida pela concessionária do que instalar o sistema fotovoltaico em sua residência, que não gerará nenhum retorno financeiro.

A curva do cenário 7 resulta em um maior VPL ao final dos 25 anos quando comparados aos outros, já o cenário 1 foi o que obteve o menor VPL, desconsiderando que o cenário 2 não gerou um VPL positivo. Os cenários 1, 2, 5, 6, 9 e 10 nos quais a carga tributária incide sobre o valor total da energia elétrica consumida, são os que apresentam pior desempenho, sendo, portanto, os menos atrativos para o consumidor, em termos de incentivo ao uso da energia solar.

Figura 2: Variação do VPL ao longo de 25 anos para os 8 cenários detalhados na Tabela 1.



Para as condições do cenário 7, o investimento é pago antes do que os outros casos e começa a gerar uma economia interessante para o usuário. As condições desse cenário com incentivo de isenção do ICMS nos cinco primeiros anos, e após esse tempo os impostos serão incididos sobre a diferença entre a energia consumida e a energia solar gerada, e considerando a bandeira vermelha, levaria a uma situação financeira mais atrativa para o usuário dentre todos os cenários apresentados.

Os detalhes do *payback* dos cenários apresentados são mostrados na **Tabela 2**, onde a vantagem do cenário 7 é evidente, seguido pelos cenários 8, 3, 4, 5, 6, 9, 10 e 1, respectivamente.

A proposta de isenção do ICMS, durante um período de tempo de cinco anos, é uma iniciativa do governo de Minas Gerais (BVK – ENERGIA SOLAR, 2015) para incentivo a instalação do sistema fotovoltaico. O recolhimento desse imposto, que pode variar de acordo com a necessidade do governo assim como a tarifa através das bandeiras e contratos, pode funcionar como uma válvula de escape para arrecadação de tributos com intuito de suprir a falta de planejamento e organização, demonstrada com a atual crise energética no país.

Outro fator importante é o estrangulamento por questões climáticas. O incentivo da diversificação da matriz energética, juntamente com a proposta de o imposto ser cobrado sobre o saldo entre o consumo e geração, é bastante atrativo para a sociedade e para o meio ambiente, e não tanto para as concessionárias de energia que só visam lucros exorbitantes e não presam pela eficiência da distribuição energética que deveria existir no Brasil.

Por um a redução do custo inicial, em que, nos cenários 9 e 10, foram feitas mantendo a carga tributária incidente sobre o valor total da energia elétrica consumida, ou seja, esses cenários foram feitos para melhorar o *payback* dos cenários 1 e 2, e foi alcançado essa redução.

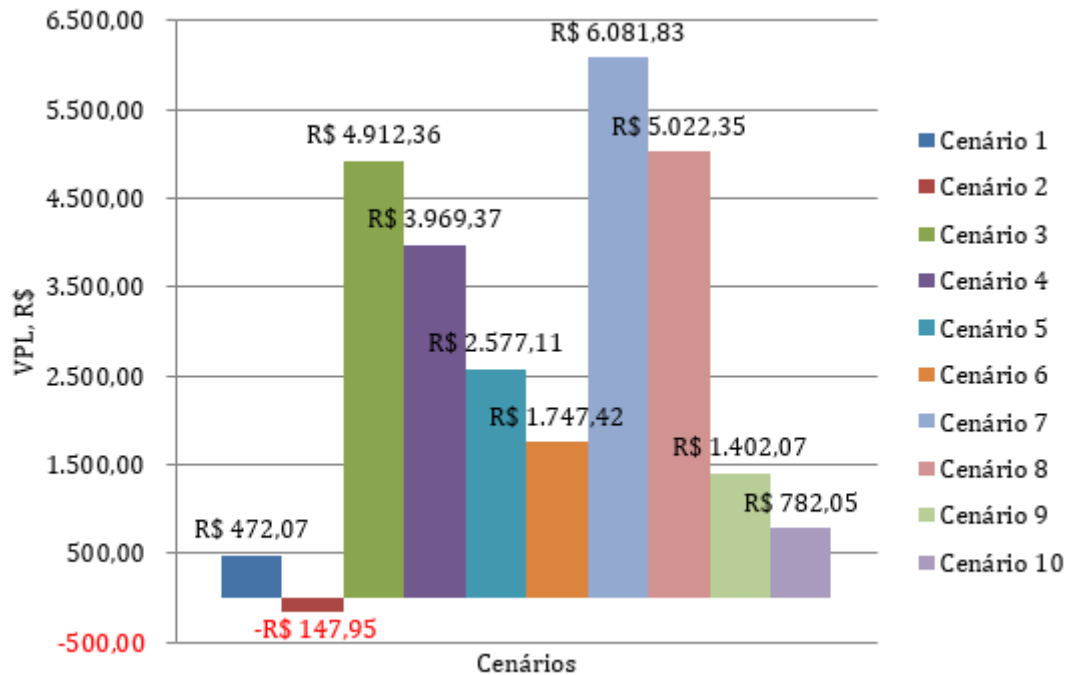
Tabela 2: *Payback* dos cenários.

Cenário	Data	<i>Payback</i>
1	Novembro de 2037	22 anos e 11 meses
2	-	-
3	Setembro de 2027	12 anos e 9 meses
4	Abril de 2029	14 anos e 4 meses
5	Agosto de 2029	14 anos e 8 meses
6	Abril de 2032	17 anos e 4 meses
7	Mai de 2025	10 anos e 4 meses
8	Novembro de 2026	11 anos e 11 meses
9	Novembro de 2033	18 anos e 11 meses
10	Abril de 2036	21 anos e 4 meses

Algumas considerações, como a taxa de reajuste anual da tarifa energética, foram tomadas a partir de alguns históricos pesquisados por Montenegro (2013) e com base nos atuais reajustes que vem sendo feitos. Quanto mais caro for essa tarifa, mais viável seria a instalação de um sistema fotovoltaico nas residências. Essa análise de sensibilidade pode ser visualizada na **Figura 3** que apresenta o VPL final para cada cenário após 25 anos.

Analisando os resultados da **Figura 3** e como comentado anteriormente, o cenário 7 obteve o melhor VPL, uma vez que nesse cenário existe uma cobrança de impostos apenas no valor líquido da conta, isenção do ICMS durante os 5 primeiros anos e a tarifação da energia elétrica com bandeira vermelha. Nesta figura fica claro que com incentivos do governo bem como uma cobrança justa do imposto, apenas na diferença entre o valor consumido da rede valor gerado pela energia fotovoltaica, aumenta o valor do VPL do projeto e reduz o tempo de retorno do mesmo, como mostra a **Tabela 2**.

Figura 3: VPL final para os 8 cenários detalhados na Tabela 1.



Não são incorporados na análise econômica o IGPM (Índice Geral de Preços do Mercado) e a taxa de iluminação pública. O IGPM, que é utilizado para a correção de contratos de aluguel e tarifas de energia elétrica, varia mensalmente. A taxa de iluminação também é sujeita a variação no mesmo município.

Estas duas contribuições aumentam o custo de energia elétrica em média de 30,00 R\$/mês (no caso das contas de luz utilizadas para esse trabalho) com consequências no VPL e na taxa de retorno do investimento.

A taxa pública é desconsiderada em virtude de que sua cobrança é considerada ilegal, por afrontar diretamente a Constituição Federal, devendo cada Município custear, através de sua própria arrecadação oriunda dos impostos que institui, o serviço de iluminação pública, assim como outros, como a limpeza pública, a coleta de lixo e a taxa de bombeiros.

A política que vem sendo adotada pelo governo é a utilização de créditos em contas futuras, decorrente do excedente não consumido gerado pelo sistema fotovoltaico. Essa política parece não ser muito atrativa financeiramente para o contribuinte, visto que o sistema fotovoltaico ainda é um investimento que tem mais um apelo ambiental do que econômico, e tem um custo inicial elevado.

Por conta disso a abordagem de comprar os módulos solares para apenas

gerar a diferença entre o custo disponibilidade e o consumo médio residencial é bastante pertinente, pois não geraria créditos, mas pelo menos um sistema com menor potência proporciona um menor custo inicial, o que tornaria financeiramente mais atrativo.

Uma iniciativa interessante do governo para estimular o uso da energia solar é a compra do equipamento ao final de sua vida útil, ou como forma de desconto para aquisição de um equipamento novo. Assim além de gerar um capital para o usuário evitaria que o equipamento seja descartado de forma inadequada.