UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Estudo do processo de impressão *offset:* princípios de modelagem e análise de fenômenos reológicos importantes

Autor: Wagner Ribeiro Fagundes

Orientador: Nilo Sérgio Medeiros Cardozo

Porto Alegre, dezembro de 11

Agradecimentos iv

Resumo vi

Lista de Figuras vii

Lista de Tabelas ix

Lista de Símbolos x

Lista de Abreviaturas e Siglas xi

1 Introdução 1

2 Conceitos fundamentais e revisão bibliográfica 3

2.1 Descrição do processo de impressão *offset* 3

2.2 Transferência de tinta e *NIP* de impressão 5

2.3 Reologia das tintas de impressão e identificação de fenômenos associados 8

2.3.1 Tack 8

2.3.2 Viscosidade 9

2.3.3 Solução de umectação 12

2.3.4 Tixotropia 12

2.3.5 Viscoplasticidade 13

2.3.6 Viscoelasticidade 14

2.4 Modelagem do processo de impressão *offset* 15

3 Metodologia 19

3.1 Equações constitutivas para tintas de impressão offset 19

3.1.1 Equações constitutivas testadas 20

3.1.2 Estimação de parâmetros dos modelos 21

3.2 Plataforma para implementação do modelo 22

4 Resultados 23

4.1 Estudo da adequação de equações constitutivas na representação da resposta viscosa de tintas de impressão 23

4.2 Estudos preliminares sobre a utilização do OpenFoam como plataforma para implementação do modelo 31

4.2.1 icoDyMFoam 31

4.2.2 interDyMFoam 32

5 Conclusões e Trabalhos Futuros 34

6 Referências 35

7 Anexos 38

7.1 Inkometer 38

7.2 Dados econômicos 39

7.3 Dados experimentais (PANGALOS,1983) 40

Agradecimentos

Aos meus pais José Fagundes (*in memoriam*) e Natália Ribeiro, pelos ensinamentos morais que me foram passados. A Vivian que me deu o presente chamado José Bernardo, e à minha irmã Karina Fagundes.

Meus sinceros agradecimentos a todos amigos que conheci neste curso. Vocês são pessoas especiais em que fico feliz ter conhecido. Em especial à Raça: Tomás Zimmer, José Azambuja, Lucas Accorsi, Eduardo Oliveira, João Paulo Fydryszewski, Matheus Freitas, Lúcio Benelli, Juliano Lapolli, Franciele Vieira, Laís Oliveira e Natasha Sievers.

Agradeço a toda equipe de professores e colaboradores do DEQUI e a Eng^{a}. Andréia Machado pela ajuda com o *software*, parabéns pelo departamento que ajudam a construir.

Agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo, cujos ensinamentos levarei para vida. Professores como ele, Nilo, nos fazem acreditar ainda mais no poder de transformação que a educação exerce na vida das pessoas.

Ao CNPq e às pessoas do LAPMA (Laboratório de Altas Pressões e Materiais Avançados, IF-UFRGS), em especial à Prof. Dra. Márcia Gallas pela confiança em meu trabalho de iniciação científica.

Agradecimento a Flávio Luzardo e ao Eng. Felipe Pasini da Böttcher do Brasil, e a Guilherme Rockenbach do jornal Zero Hora.

"E aqueles que dançavam foram julgados insanos por aqueles que não podiam escutar a música."

Friedrich Nietzsche

Resumo

O processo de impressão *offset* é o processo mais importante industrialmente para impressão em papel e cartão. Fatores como deposição de filmes finos de tinta a altas velocidades, reologia complexa das tintas utilizadas, necessidade de balanço adequado entre os diferentes tipos de força envolvidas e elevada gama de matérias-primas existentes no mercado tornam complexas as atividades relacionadas à adequação das condições de processo em decorrência de alterações de matéria-prima ou da produção. Por este motivo, é de grande interesse prático o entendimento dos fenômenos associados ao transporte e à transferência da tinta e de como estes fenômenos afetam a qualidade do produto impresso. Inserido neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo disponibilizar informações que possam ser úteis para, em uma etapa futura, desenvolver um simulador para o processo de impressão. Primeiramente são discutidos os principais aspectos considerados na literatura para modelagem do processo, identificando-se a zona de separação do *nip* de impressão como o ponto mais importante em termos de modelagem, apresentando-se os aspectos mais importantes descritos por diferentes autores para a modelagem adequada desta região. Posteriormente, faz-se uma análise da adequação de um conjunto de equações constitutivas viscoplásticas e pseudoplásticas na representação de das curvas de escoamento de 19 tintas que cobrem uma gama de composições representativa das tintas disponíveis no mercado para este tipo de aplicação. O modelo de Herschel-Bulkley foi aquele que apresentou melhor adequação entre os quatro modelos testados. Finalmente, analisou-se o potencial de utilização dos *solvers* interDyMFoam e icoDyMFoam, disponíveis no pacote OpenFoam, como plataforma para implementação de um simulador para o processo de impressão *offset*. Conclui-se que nos dois casos deveriam ser efetuadas modificações no código original dos *solvers* a fim de adaptá-los às necessidades inerentes à modelagem do processo em estudo.

Lista de Figuras

Figura 2-1: **A)** Sistema *offset* de impressão: A) transporte de solução de umectação e de tinta. **B)** Rolos formadores de filme de tinta e de umectação na matriz (adaptado de Voltaire, 2004). 4

Figura 2-2: Cilindros de impressão, transferência de tinta para a blanqueta. 4

Figura 2-3: Cilindros de impressão, *offset* rotativa. A) Máquina imprimindo. B) Máquina parada. 5

Figura 2-4: Síntese subtrativa. (Cruz *et al,* 2005) 5

Figura 2-5: *Nip* de impressão: separação do filme de tinta entre a blanqueta e o substrato (adaptado de Voltaire, 2004). 6

Figura 2-6: Imagem na matriz e à direita imagem impressa com ganho de ponto. . 6

Figura 2-7: Três zonas do *nip* de impressão (adaptado de PANGALOS, 1983). 7

Figura 2-8: Perfil de pressão no *nip* de impressão (adaptado de PANGALOS, 1983). 7

Figura 2-9: Curva característica para mensuração de *tack* em separação de filme de tinta (Voltaire, 2004). 9

Figura 2-10: Impressora *offset* rotativa com névoa: baixo tack de tinta. (Chemicals Coldset, outubro 2006). 9

Figura 2-11: Impressora *offset* rotativa com 'voagem': baixa viscosidade da emulsão de tinta. (Chemicals Coldset, outubro 2006). 10

Figura 2-12: Viscosidade em função da taxa de cisalhamento para três tintas de impressão *offset* plana @45°C. (Weisbecker, Sun Chemical *Corporation, North American Inks*). 11

Figura 2-13: Tinteiro R200 (ManRoland Corporation, adaptado). 13

Figura 2-14: Comparação entre fluido newtoniano, sólido na região plástica e um fluido que segue a lei da potência. (Macosko,1994). 14

Figura 2-15: Comparação da resposta à tensão aplicada entre um sólido de Hooke e um Fluido de Newton. (Macosko, 1994). 15

Figura 2-16:Modelo para transferência de tinta na terceira zona do nip de impressão. (Ahmed, 2010). 17

Figura 2-17: Passos de tempo de simulação para separação do filme de tinta. A) modelo Newtoniano. B) Modelo de Carreau (Ahmed e Sung, 2010). 18

Figura 4-1: τ [Pa] *versus* taxa de cisalhamento [s^{-1}] para modelo predito Casson generalizado (tinta18), escalas logarítmicas. 24

Figura 4-2: τ [Pa] *versus* taxa de cisalhamento [s^{-1}] para modelo predito Herschel-Bulkley (tinta8), escalas logarítmicas. 26

Figura 4-3: τ [Pa] *versus* taxa de cisalhamento [s^{-1}] para modelo predito de Bingham (tinta16). Abscissa em escala logarítmica. 27

Figura 4-4: η [Pa.s] *versus* taxa de cisalhamento [s^{-1}] para modelo predito Carreau-Yasuda (tinta5). Abscissa em escala logarítmica. 29

Figura 4-5: Valores preditos e valores experimentais para a tinta1. Escalas logarítmicas. 30

Figura 4-6: Exemplo cone móvel resolvido pelo icoDyMFoam. Pressão em atm... 32

Figura 4-7: Exemplo de água escoando por gravidade. interDyMFoam..... 33

Figura 7-1 *Inkometer*, fabricante K&N. 38

Figura 7-2: Consumo nacional de tintas para impressão. (Fonte: ABITIM) 39

Lista de Tabelas

Tabela 1: Resultados de parâmetros preditos para o modelo de Casson generalizado 24

Tabela 2: Resultado de parâmetros preditos para o modelo de Herschel-Bulkley. 25

Tabela 3: Resultado de parâmetros preditos para o modelo de Bingham. 27

Tabela 4: Resultado de parâmetros preditos para o modelo de Carreau-Yasuda.. 28

Tabela 5: Comparação da estimação dos parâmetros para as quatro equações analisadas. 30

Tabela 6: Consumo de tintas para impressão industrial no Brasil. (Fonte: ABITIM) 39

Lista de Símbolos

λ – tempo de relaxação [s]

γ - fração ocupada pelo líquido [-]

$\dot{\gamma}$ - taxa de deformação [s^{-1}]

η – viscosidade generalizada [Pa.s]

η_0 – viscosidade à taxa de cisalhamento nulo [Pa.s]

η_∞ – viscosidade à taxa de cisalhamento infinito [Pa.s]

τ – tensor das tensões totais [Pa]

τ_{0CG} – tensão à taxa de cisalhamento nulo do modelo de Casson generalizado [Pa]

τ_{0HB} – tensão à taxa de cisalhamento nulo do modelo de Herschel-Bulkley [Pa]

τ_{0B} – tensão à taxa de cisalhamento nulo do modelo de Bingham [Pa]

τ_{0CG} – tensão à taxa de cisalhamento nulo do modelo de Casson generalizado [Pa]

τ_{0C} – tensão à taxa de cisalhamento nulo do modelo de Carreau-Yasuda [Pa]

m_{CG} – parâmetro de potência de Casson generalizado [-]

n_{CG} – parâmetro da potência do modelo de Casson generalizado [-]

n_{HB} – numero da potência do modelo de Herschel-Bulkley [-]

n_C – parâmetro de potência do modelo de Carreau-Yasuda [-]

k_{CG} – índice de consistência do modelo de Casson generalizado [Pa.s]

k_B – índice de consistência do modelo de Bingham [Pa.s]

k_{HB} – índice de consistência do modelo de Herschel-Bulkley [Pa.s]

Tau_n – Tensão aplicada pelo reômetro da tinta n [Pa]

GP_n – Taxa de cisalhamento (gamma ponto) aplicada pelo reômetro para tinta n [s^{-1}]

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABITIM: Associação Brasileira das Indústrias de Tintas para Impressão

ISO: *International Organization for Standardization*

CFD: *Computational Fluid Dynamics*

VOF: *Volume of Fluid*

OpenFoam: *Open Source Field Operation and Manipulation*

FOGRA: *Forschungsgesellschaft Druck e.V. [Fogra Graphic Technology Research Association]*

1 Introdução

A reologia é um ramo da ciência que estuda as propriedades de escoamento e a relação tensão-deformação nos materiais. A maioria dos fenômenos reológicos característicos de materiais de estrutura complexa não pode ser descrita pelas equações de Hooke, para os sólidos, ou de Newton, para os fluidos. Em conseqüência disto, existem na literatura um número muito grande de equações constitutivas mecânicas, empíricas ou baseadas em diversas teorias, que tentam descrever o comportamento reológico de diferentes fluidos não newtonianos, ou seja, aqueles que se desviam do comportamento reológico predito pela lei Newton para a viscosidade.

As tintas de impressão *offset* se enquadram na categoria de fluidos altamente não newtonianos, por serem misturas complexas que envolvem a dispersão de sólidos em polímeros, sendo que suas propriedades afetam diretamente as configurações das impressoras, assim como a qualidade do produto final.

No contexto econômico, o consumo de tintas para impressão vem crescendo nos últimos quinze anos no Brasil. Conforme a ABITIM, foram consumidas 113,2 mil toneladas de tintas para impressão em 2010. Este consumo é equivalente a U$D 714,5 milhões. Desta quantidade total, aproximadamente 18% é de tintas importadas, sendo o restante de produção nacional.

Aspectos reológicos das tintas de impressão e como estas propriedades materiais influenciam o processo de impressão são estudados antes mesmo de existir a impressão *offset* (Stefan, 1874), quando a tipografia era a principal forma de impressão industrial. Alguns aspectos relacionados à reologia das tintas de impressão são abordadas pelas normas ISO 12644 e ISO 12634, que padronizam medidas de viscosidade e *tack*. Existem também outras normas que padronizam propriedades colorimétricas como a ISO 12647 e a ISO 12647-2, que certificam empresas cujos processos estão de acordo com o gerenciamento de cores.

No entanto, existem muitos fabricantes de tintas de impressão, e cada fabricante com um *mix* variado de tintas, para diferentes insumos de processo e de substratos.

Desta forma, a indústria gráfica como agente transformador sofre com *setup's*, desperdício de matéria prima e resultados insatisfatórios, já que a adaptação do processo a mudanças na tinta utilizada pela impressão ainda é feita por meio de tentativa e erro.

2 Conceitos fundamentais e revisão bibliográfica

2.1 Descrição do processo de impressão *offset*

O processo de impressão *offset*, também conhecido por impressão litográfica, teve origem nos Estados Unidos, através do norte americano Ira Washington Rubel no ano de 1904. Atualmente é o processo mais utilizado no mundo para impressão em papel e cartão, sendo também utilizado para impressão de outros substratos.

A impressão *offset* é um processo indireto de impressão, ou seja, a imagem a ser impressa não é transferida diretamente da matriz para o substrato, ocorre através de um cilindro intermediário. A alimentação do papel pode ser por folhas (*sheetfed-offset*) ou bobinas (*web-offset*), processos conhecidos no Brasil como *offset* plana e rotativa, respectivamente.

A matriz, geralmente uma chapa de alumínio, contém duas regiões com características físico-químicas distintas. A área de imagem é uma camada polimérica lipofílica, enquanto a área de não-imagem (contra-grafismo) é hidrofílica.

Os componentes básicos de um sistema de impressão offset são representados na Figura 2.1. O sistema de umectação (**Figura 2-1** A) tem como finalidade formar um filme fino de solução de umectação e manter a hidrofilia nas regiões de contra-grafismo. A tinta é ancorada nas áreas de grafismo sobre a matriz. Esta etapa de formação de filme é onde ocorre o contato entre tinta e solução de umectação, com a formação de uma emulsão, cuja estabilidade é fundamental para a qualidade do impresso.

A tinta é transportada até a matriz por um conjunto de rolos com características desenvolvidas para esta finalidade. A rolaria tem como função transportar a tinta e manter uma fina camada de tinta sobre a matriz, servindo também como um sistema de acúmulo para compensar regiões de entintamento distintas. Os rolos que entram em contato com a matriz são denominados formadores, pois sua principal finalidade é formar o filme (de tinta ou de umectação) sobre ela.

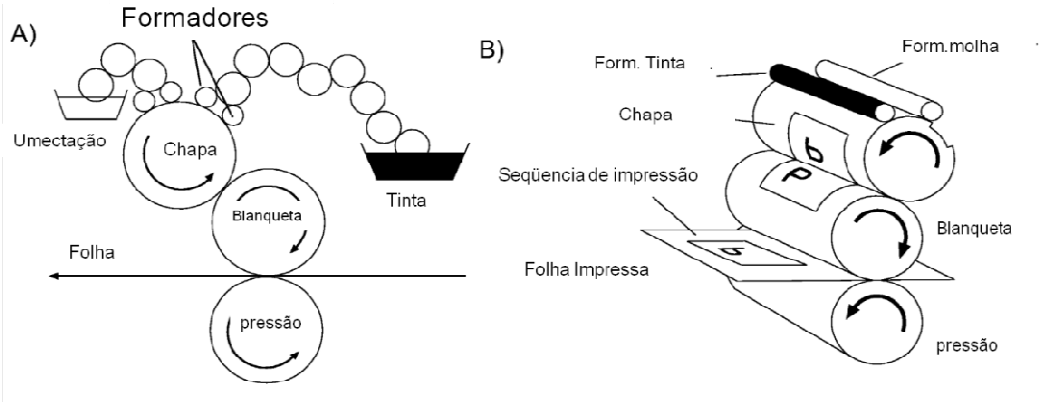

Figura 2-1: **A)** Sistema *offset* de impressão: A) transporte de solução de umectação e de tinta. **B)** Rolos formadores de filme de tinta e de umectação na matriz (adaptado de Voltaire, 2004).

Após o contato com os rolos formadores, a tinta é transportada para a blanqueta (**Figura 2-2**), manta de borracha que reveste um cilindro. Esta manta transfere a imagem para o substrato, através de um cilindro de contra-pressão, ou através do contato de outra blanqueta, no caso de *offset* rotativa, mostrada na **Figura 2-3**.

Figura 2-2: Cilindros de impressão, transferência de tinta para a blanqueta.

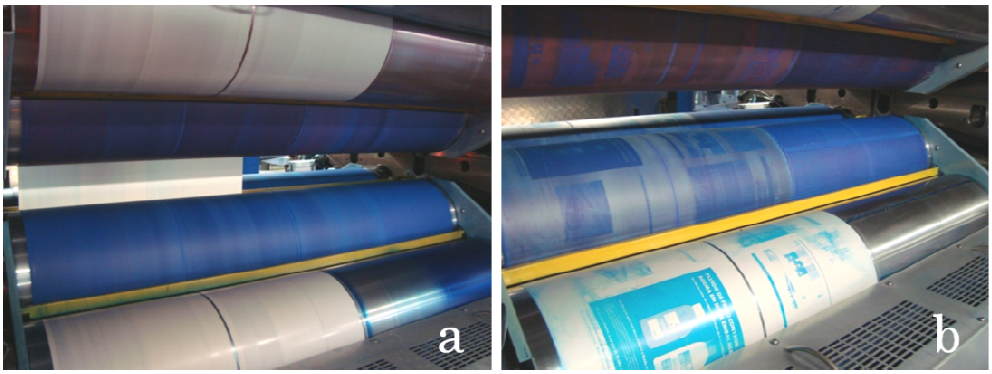

Figura 2-3: Cilindros de impressão, *offset* rotativa. A) Máquina imprimindo. B) Máquina parada.

Cada unidade de impressão é responsável pela transferência de uma cor de tinta. A sobreposição das cores da síntese subtrativa (Figura 2-4) ciano, magenta e amarelo, com a adição do preto, padronizadas pela escala europa (FOGRA,2011), formam o espectro de impressão característico de cada equipamento.

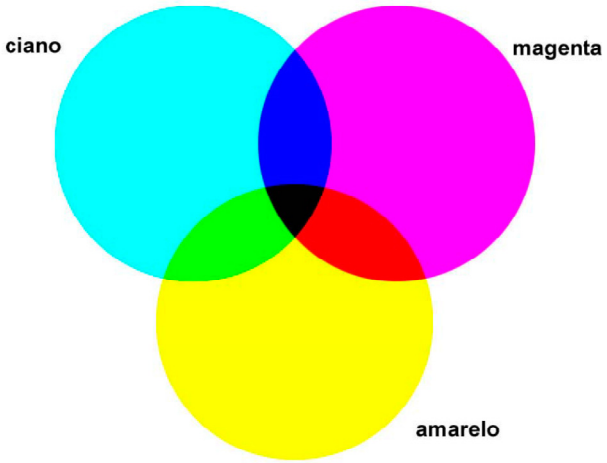

Figura 2-4: Síntese subtrativa. (Cruz *et al,* 2005)

2.2 Transferência de tinta e *NIP* de impressão

Em cada rolo que a tinta é transportada, até chegar ao papel, existe um processo de separação do filme em duas partes, processo este denominado *NIP* de impressão. Os

dois *nips* mais importantes são os que ocorrem entre a matriz e a blanqueta e entre a blanqueta e o substrato (**Figura 2-5**).

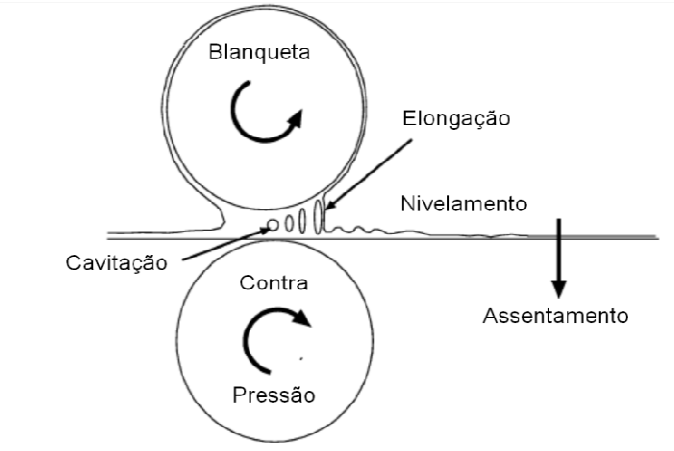

Figura 2-5: *Nip* de impressão: separação do filme de tinta entre a blanqueta e o substrato (adaptado de Voltaire, 2004).

Estes dois processos estão intimamente ligados à qualidade do impresso, pois a imagem a ser impressa deve ser reproduzida com o máximo de detalhamento existente na matriz, sem perdas ou ganhos de área de imagem (*dot-gain, dot-less*), representados na **Figura 2-6**. No caso do *nip* entre a blanqueta e o substrato, as características da superfície da borracha são fundamentais para ocorrer boa transferência.

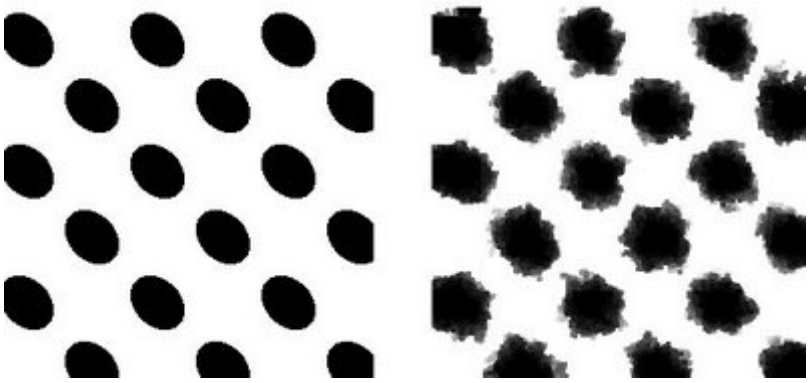

Figura 2-6: Imagem na matriz e à direita imagem impressa com ganho de ponto.

No trabalho de Pangalos (1983), é definido o *nip* como um processo que ocorre em três etapas, formando três distintas zonas: zona de entrada, zona de deformação e zona de separação (**Figura 2-7**).

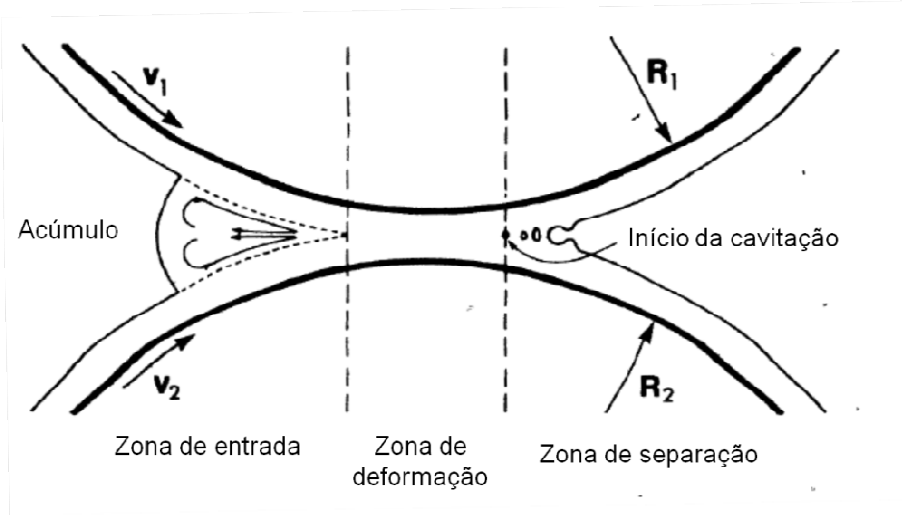

Figura 2-7: Três zonas do *nip* de impressão (adaptado de PANGALOS, 1983).

Na zona de entrada existe um acúmulo de tinta, na zona de deformação é onde ocorre a maior tensão e taxa de cisalhamento. A cavitação dos solventes mais voláteis da tinta ocorre devido à diminuição de pressão, logo após a zona de deformação, conforme representado nos perfis apresentados na **Figura 2-8**.

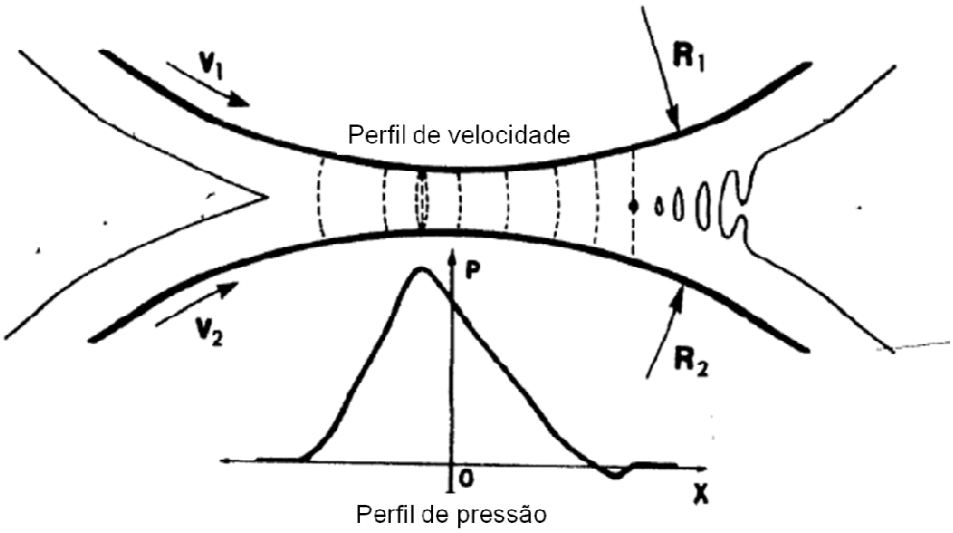

Figura 2-8: Perfil de pressão no *nip* de impressão (adaptado de PANGALOS, 1983).

Conforme Voet (1952), as três etapas do nip duram aproximadamente 5% do tempo de uma rotação completa de um rolo em seu eixo.

2.3 Reologia das tintas de impressão e identificação de fenômenos associados

A tinta para impressão é uma mistura complexa que envolve a dispersão de pigmentos (sólidos) em uma mistura de óleos e resinas. As propriedades de escoamento e de transferência são afetadas pelas propriedades materiais dos componentes envolvidos, variando conforme a composição e tipo de material escolhido para desenvolver determinada função na mistura. A seguir são apresentados algumas das propriedades e/ou características reológicas mais importantes para uma tinta de impressão *offset*, juntamente com o papel de cada uma delas no desempenho do processo.

2.3.1 Tack

Tack também conhecido como 'pegajosidade' de um fluido é a força de resistência à separação do filme em duas partes (Voltaire, 2004). O *tack* depende de muitos fatores, como a coesão interna do fluido e a molhabilidade deste fluido na superfície à qual se adere, sendo influenciado tanto pelas propriedades da tinta como também pelas da superfície à qual esta será aderida e também à qual será transferida.

Geralmente, o *tack* de tintas é medido pelo teste ISIT (*Ink Surface Interation Tester*), A força de *tack* é o ponto máximo da curva força *versus* tempo de separação, enquanto que o impulso de tack é a área sobre esta curva. Uma curva típica obtida neste teste é apresentada na **Figura 2-9**.

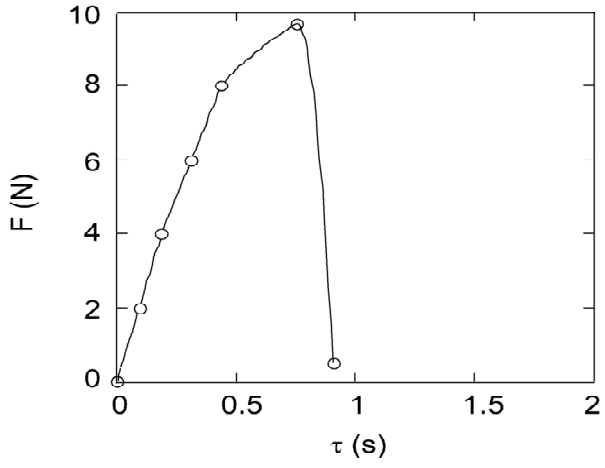

Figura 2-9: Curva característica para mensuração de *tack* em separação de filme de tinta (Voltaire, 2004).

No momento que esta curva atinge seu valor máximo, termina a separação e a força reativa tende à zero. Quando a força máxima exercida pelo fluido é maior do que o a resistência à tração na superfície do substrato, ocorre o fenômeno denominado '*picking*' ou arrancamento. No caso de impressão sobre papel, formam-se, então, pequenas zonas com falhas de impressão, provenientes do arrancamento da fibra do papel.

Outro problema recorrente associado ao *tack* é a formação de névoa ao redor das unidades impressoras. Na **Figura 2-10**, uma imagem de uma unidade de impressão do amarelo, que geralmente é uma tinta com o *tack* baixo, e formação de névoa durante a impressão.

Figura 2-10: Impressora *offset* rotativa com névoa: baixo tack de tinta. (Chemicals Coldset, outubro 2006).

2.3.2 Viscosidade

Na impressão *offset*, a tinta é submetida a altas taxas de cisalhamento no transporte até a matriz. Em impressoras planas, essas taxas são da ordem de 3×10^4 s^{-1},

enquanto que em impressoras rotativas superiores a 5×10^4 s^{-1}. Isto se deve ao fato de a espessura da película de tinta sobre os rolos impressores ser da ordem de 8 a 10µm (Pnee, 1979) e na matriz de 1 a 3 µm, estando submetidas a altas velocidades angulares e a baixas velocidades elongacionais, na ordem de 2 $m.s^{-1}$.

Dependendo da composição da tinta, que determina o nível de pseudoplasticidade apresentado por esta, a viscosidade nas condições de processo pode atingir valores muito baixos, dando origem ao problema conhecido por "voagem" na impressora, devido ao fato de as forças viscosas passarem a ser menores que as inerciais. A **Figura 2-11** apresenta uma unidade de impressão de magenta com a ocorrência de voagem, juntamente com uma representação esquemática da formação de gotículas de tinta sendo espirradas para fora do sistema impressor.

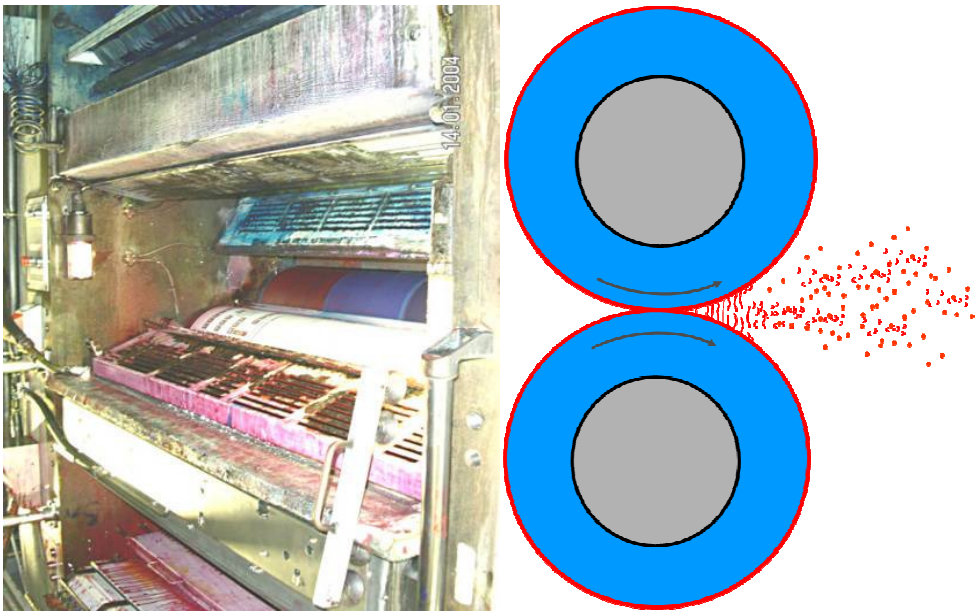

Figura 2-11: Impressora *offset* rotativa com 'voagem': baixa viscosidade da emulsão de tinta. (Chemicals Coldset, outubro 2006).

Na literatura (Pangalos, 1983) o fenômeno de "voagem" é conhecido também como "*misting, flying, spraying, clouding* ou *fogging*".

Na **Figura 2-12** tem-se as curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento, para três diferentes tintas de *offset* plana, sendo possível observar que o nível de pseudoplasticidade pode variar bastante de uma tinta para outra.

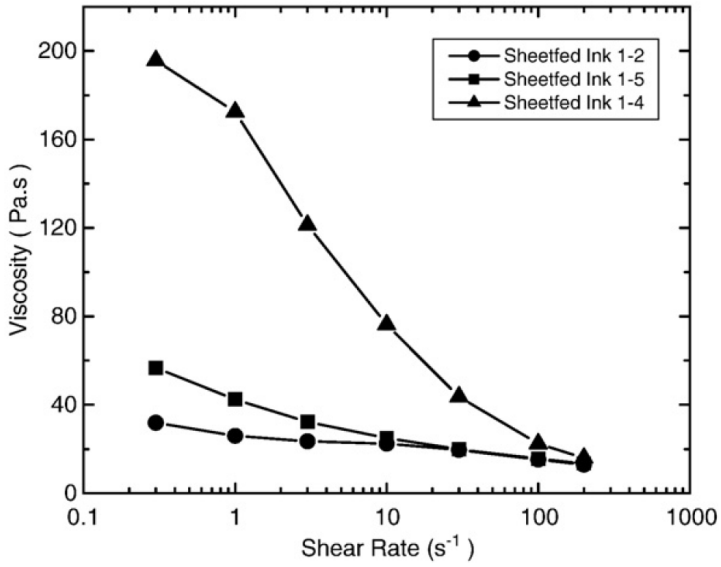

Figura 2-12: Viscosidade em função da taxa de cisalhamento para três tintas de impressão *offset* plana @45°C. (Weisbecker, Sun Chemical *Corporation, North American Inks*).

PANGALOS (McGill University, 1983) em sua tese de doutorado fez diversas inferências sobre propriedades reológicas das tintas de impressão, realizou ensaios em reômetro rotacional e em equipamento específico, o *inkometer (ver anexo 1)*, para diversas composições de tintas. Seus resultados experimentais foram divulgados em sua tese e serviu como base para este trabalho. Neste trabalho um dos seus principais objetivos foi mensurar a pseudoplasticidade através do*'shear thinning'* a partir de variações na composição das tintas. Para tanto, variou a composição de dezenove tintas e realizou medidas em reômetro rotacional,

Para fins comerciais, os aspectos sensoriais das tintas de impressão são considerados fundamentais, pois a percepção de tato influencia na concepção de qualidade do material, principalmente pelas pessoas da operação. Desta forma, propriedades reológicas foram estudadas por Weisbecker *et al* (2008) através de medidas em reômetro rotacional de viscosidade complexa η^*.

A viscosidade complexa é definida como

$$\eta^* = \frac{[(G')^2 + (G'')^2]^{1/2}}{\omega} \quad (1)$$

Onde G'e G'' são os módulos de armazenamento e de perda, respectivamente, calculados a partir do ângulo de fase (δ) do ensaio, defasado em relação ao ângulo senoidal gerado pelo reômetro; ω é a frequência angular do ensaio.

Com medidas destes parâmetros, desenvolveram uma metodologia que classifica as tintas de uma escala que vai de macia (*soft*) á rígida (*stiff*). Esses parâmetros são utilizados como controle de qualidade dos seus processos de fabricação.

2.3.3 Solução de umectação

Mesmo não estando associada diretamente à reologia das tintas, portanto não totalmente adequado ao título deste capítulo, a solução de fonte apresenta funcionalidade importante no que diz respeito à estabilidade do processo de impressão.

Em sua formulação, a solução de fonte contém aditivos cuja função é manter a coesão da tinta durante a terceira zona do *nip* de impressão. Nesta região, a solução de umectação tem como função propiciar elevada tensão na interface dos dois fluidos (solução de umectação-tinta), para aumentar as forças coesivas das gotas que tendem a ser formadas pela cavitação. Assim sendo, uma boa solução de fonte pode contrabalançar os efeitos indesejáveis de baixo *tack* e baixa viscosidade para tintas nas quais essas características ocorrem. Fernandez (1998) e Hohne (2008) estudaram as interações existentes entre tinta, componentes da solução de umectação e substrato.

2.3.4 Tixotropia

Em uma impressora *offset*, o principal efeito percebido pelos operadores para a tixotropia da tinta é no tinteiro, onde a tinta em contato com o rolo ductor tem a sua viscosidade diminuída com o tempo, até ocorrer a separação da massa de tinta do cilindro, como é mostrado em linhas pontilhadas na **Figura 2-13**.

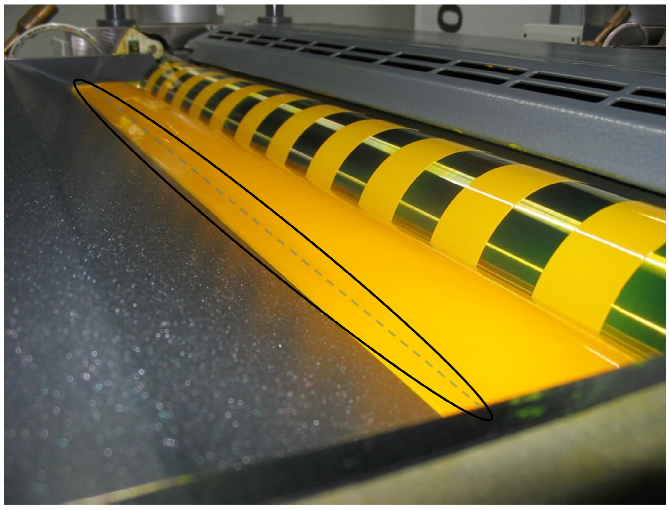

Figura 2-13: Tinteiro R200 (ManRoland Corporation, adaptado).

2.3.5 Viscoplasticidade

Fluidos viscoplásticos são aqueles que precisam de uma tensão mínima para iniciar seu escoamento, diferentemente dos fluidos newtonianos. Exemplo clássico deste comportamento é o creme dental que inicia o escoamento a partir de uma força aplicada em sua embalagem.

O escoamento iniciar a partir de uma tensão mínima está associado às forças necessárias para orientação das conformações moleculares, geralmente polímeros ou compostos de elevadas massas moleculares. A partir da orientação, o escoamento é facilitado e a relação entre tensão aplicada e taxa de deformação seguem um comportamento semelhante à lei da potência. **Figura 2-14**.

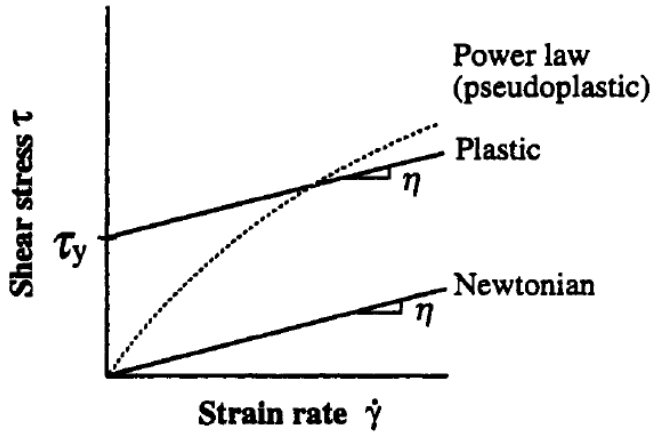

Figura 2-14: Comparação entre fluido newtoniano, sólido na região plástica e um fluido que segue a lei da potência. (Macosko,1994).

O comportamento viscoplástico da tinta é percebido quando esta contida em uma embalagem. Tintas de alguns fabricantes não iniciam o escoamento ao se virar a embalagem, por exemplo.

2.3.6 Viscoelasticidade

Fluidos viscoelásticos são aqueles que, quando aplicada uma tensão (normal ou cisalhante), apresentam comportamento intermediário entre um fluido de Newton e um sólido de Hooke. Quando a cessa a tensão aplicada, a resposta elástica do material predomina sobre a viscosa, e a relaxação ocorre seguindo uma tendência exponencial. A **Figura 2-15** apresenta qualitativamente este comportamento descrito.

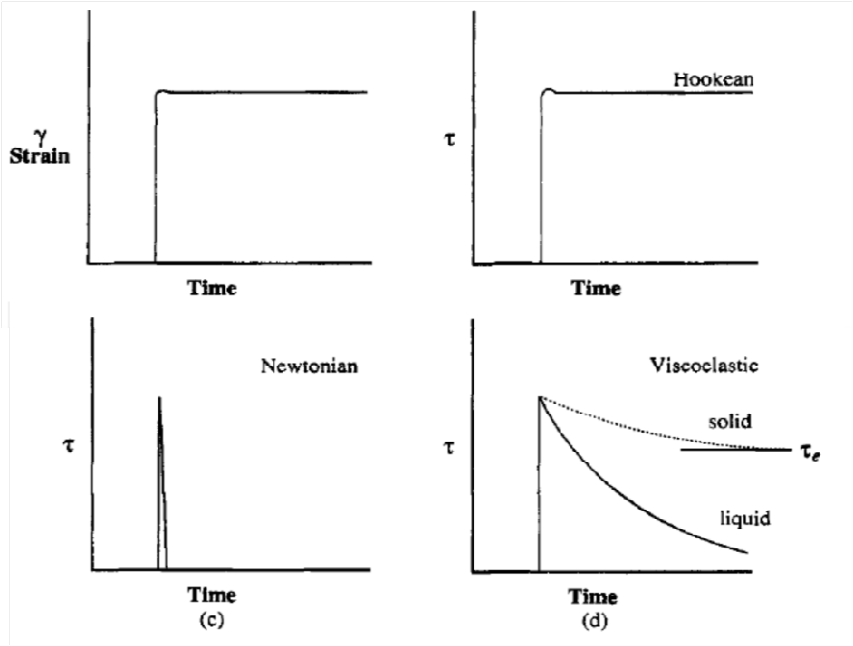

Figura 2-15: Comparação da resposta à tensão aplicada entre um sólido de Hooke e um Fluido de Newton. (Macosko, 1994).

A estabilidade do filme de tinta formado sobre o substrato está relacionada diretamente com a resposta elástica da tinta. Na terceira zona do *nip* de impressão a tinta transferida para a superfície subseqüente não deve conter tensões residuais do processo de elongação à qual foi submetida anteriormente, este fenômeno gera instabilidade e conseqüentemente baixa qualidade no impresso.

2.4 Modelagem do processo de impressão *offset*

Os aspectos discutidos nas seções anteriores evidenciam a complexidade inerente do processo de impressão *offset*, em função de fatores como deposição de filmes finos de tinta a altas velocidades, características reológicas dos materiais utilizados, necessidade de balanço adequado entre forças viscosas, forças elásticas, forças de inércia e forças devidas à tensão superficial. Tal complexidade e a elevada gama de matérias-primas existentes para este setor permitem entender porque atividades relacionadas à adequação das condições de processo em decorrência de alterações de matéria-prima, padrões de cores ou produção envolvem quase sempre um custo elevado, tanto em termos de tempo como de matéria-prima. Por este motivo, é de grande interesse prático

o estabelecimento de modelos adequados para este processo, os quais permitam predizer o desempenho de um produto no processo a partir de do conhecimento das suas propriedades reológicas e/ou predizer condições adequadas de processo para a utilização de um produto com propriedades específicas.

Criar um bom modelo para este problema envolve simplificações geométricas para o escoamento como, por exemplo, considerar o fluxo puramente elongacional na separação do filme de tinta. Como muitas propriedades materiais da tinta são relevantes para o seu desempenho no processo, a escolha de uma equação constitutiva adequada ao problema é de grande importância para obtenção bons resultados na simulação. Os primeiros trabalhos de simulação para esta situação foram feitos considerando fluido newtoniano, devido às complicações matemáticas que surgem quando existe interesse de caracterizar melhor as propriedades reologias envolvidas.

Com relação ao detalhamento do processo na etapa de modelagem, na literatura encontram-se publicações relacionadas aos diferentes aspectos do processo de impressão *offset* de todas estas áreas, de artigos técnicos a dissertações e teses. Através destes estudos foi proposto que a zona de separação (Figura 2-7) é mais crítica para o desempenho do processo, sendo quem recebeu maior atenção na literatura [4,5,6,16].

Os primeiros estudos feitos sobre transferência da tinta no processo *offset* e, consequentemente, o desenvolvimento da teoria do *nip* de impressão foram de Gatcombe (1945) e Banks-Mill (1954). Posteriormente, outros trabalhos confirmaram o papel fundamental exercido pelo *nip* de impressão e, mais especificamente, a terceira zona deste nos diferentes aspectos relacionados a qualidade do produto, como definição da imagem e problemas associados à perda/ganho de pontos em relação à imagem da matriz.

Sendo predominantemente elongacional, o escoamento na terceira zona de *nip* de impressão pode ser representado pelo modelo apresentado na **Figura 2-7**, na qual o fluido está aderido a duas superfícies planas (considerando que o diâmetro do cilindro é grande o suficiente para que a curvatura da superfície nesta região possa ser negligenciada), com condição de não escorregamento nas duas superfícies, sendo o a elongação provocada pelo afastamento das superfícies à medida que os cilindros giram.

Como a transferência ocorre entre duas placas que se afastam, existe a necessidade de se trabalhar com domínio móvel, pois o volume de controle considerado está variando a sua forma. Nas superfícies que não são as placas, a condição de contorno é a de interface com o outro fluido (ar/solução de umectação).

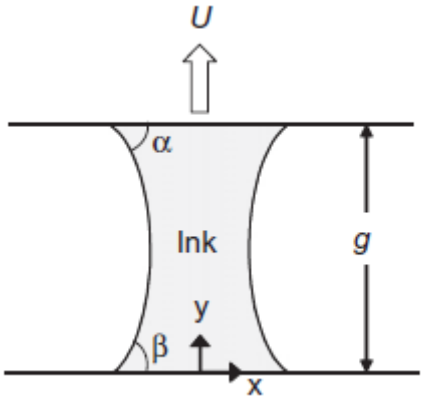

Figura 2-16:Modelo para transferência de tinta na terceira zona do nip de impressão. (Ahmed, 2010).

As equações básicas que devem ser resolvidas são: a de continuidade, considerando fluido incompressível e a de quantidade de movimento, com uma parcela de forças de superfície devido à tensão superficial e de interface tinta-solução de fonte. Para tanto, devem estar disponíveis equações de velocidade aplicada e uma equação constitutiva que descreva adequadamente os comportamentos viscosos e elásticos.

Os resultados mais relevantes encontrados na literatura utilizando estas bases de modelagem, foram os apresentados por Ahmed e Sung (2010), os quais, através de simulações em CFD utilizando o método VOF, compararam as predições de evolução do estado de deformação do filme de tinta na zona de separação utilizando dois modelos constitutivos: fluido newtoniano e o modelo pseudoplástico de Carreau (ver Seção 3.1.1). A **Figura 2-17** mostra um dos resultados obtidos por estes autores, onde se apresenta o estado do filme em diferentes passos de tempo de simulação.

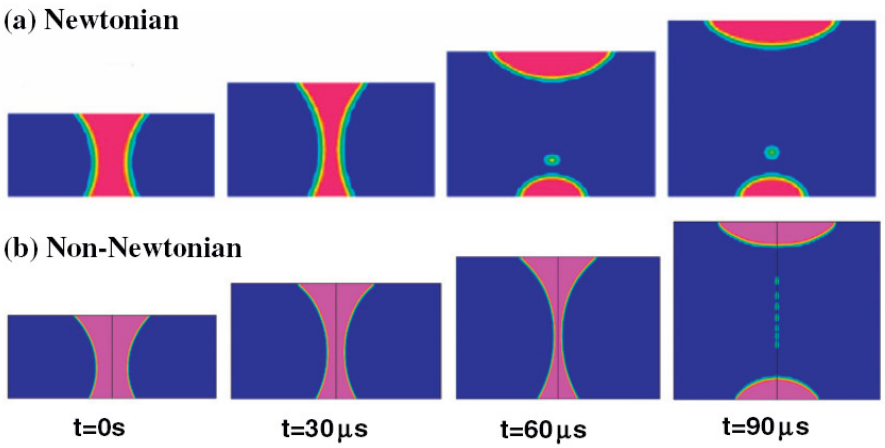

Figura 2-17: Passos de tempo de simulação para separação do filme de tinta. A) modelo Newtoniano. B) Modelo de Carreau (Ahmed e Sung, 2010).

Através desta análise, os autores conseguiram também estabelecer relações entre a taxa de transferência de tinta e o ângulo de contato entre tinta e matriz e predizer a formação de gotículas de tinta para altas taxas de cisalhamento **Figura 2-17**. No entanto, apesar da relevância qualitativa destes resultados, os autores não apresentaram comparação das predições numéricas com dados experimentais.

A adequação qualitativa dos resultados apresentados por Ahmed e Sung indicam que as bases da modelagem utilizadas por estes autores são adequadas e tem potencial para aplicações práticas, justificando a sua utilização como ponto de partida para trabalhos futuros.

3 Metodologia

A partir da etapa de revisão bibliográfica foi possível foi possível tanto estabelecer o ponto de partida para o desenvolvimento de um simulador para o processo de impressão *offset*, que seria baseado nas estratégias de modelagem descritas na Seção 2.4, como identificar a adequada representação reológica das tintas utilizadas como um ponto fundamental para a representação adequada do processo.

A partir desta informação foram definidos os pontos a serem estudados na segunda etapa deste trabalho, que constituem etapas preliminares para o desenvolvimento de um simulador para o processo em estudo: i) a identificação de equações constitutivas que possam descrever adequadamente o comportamento de tintas correspondentes a uma gama ampla de composição; ii) análise preliminar de alternativas de plataformas para implementação do referido modelo. A metodologia utilizada com relação a estes dois pontos é descrita a seguir.

3.1 Equações constitutivas para tintas de impressão offset

Nos trabalhos encontrados na literatura, conforme apresentado no capítulo anterior, somente foram utilizadas duas equações constitutivas puramente viscosas: a de fluido newtoniano e o modelo de Carreau, que é um dos modelos puramente viscosos classificados com fluidos newtonianos generalizados (FNG). O único efeito não newtoniano incorporado pelos FNG é a dependência da viscosidade com a taxa de deformação, não considerando, portanto, viscoplasticidade, tixotropia e viscoelasticidade.

O fato de que equações constitutivas puramente viscosas podem não permitirem predizer efeitos elásticos no escoamento e podem apresentar limitações na predição da viscosidade elongacional representa uma limitação importante com relação às características do processo em estudo. Assim, o uso de modelos constitutivos viscoelásticos seria uma necessidade natural para a modelagem deste processo. No entanto, devido à inexistência na literatura de dados reológicos adequados para a

estimação de parâmetros de modelos viscoelásticos para tintas de impressão *offset* e à impossibilidade de caracterizar reológicamente um conjunto grande e adequado de tintas no período disponível para a realização deste trabalho, a opção utilizada foi utilizar dados de viscosidade disponíveis na literatura e testar a adequação de diferentes modelos dos tipos FNG e viscoplásticos. Cabe ressaltar que, no entanto, os resultados obtidos desta forma serão úteis também em uma etapa futura de análise de modelos viscoeláticos, pois um modelo viscoelástico tem que descrever tanto a resposta viscosa como a resposta elástica. Assim, tendo-se o conhecimento das características de resposta viscosa das tintas, no momento de utilizar a adequação de modelos viscoelásticos para este tipo de sistema, seriam necessários somente a obtenção de dados para estimação de parâmetros relativos à resposta elástica destes materiais.

3.1.1 Equações constitutivas testadas

Como já mencionado anteriormente, o comportamento não newtoniano que possuem as tintas de impressão podem ser descritos por diversas equações constitutivas, cada uma com a finalidade de representar melhor algum tipo de comportamento específico. As equações testadas descrevem pseudoplasticidade e viscoplasticidade.

- **Bingham**

O modelo de Bingham contém dois parâmetros, τ_{0B} é a tensão mínima de escoamento e k_b que tem unidade de viscosidade.

$$\tau_{yx} = \tau_{0B} + k_B \dot{\gamma}_{yx} \qquad (2)$$

- **Casson e Casson generalizado**

Os modelos de Casson (3) e Casson generalizado (4) contem dois e três parâmetros, respectivamente.

$$(\tau_{yx} - \tau_{0C})^{1/2} = k_c \dot{\gamma}_{yx}{}^{1/2} \qquad (3)$$

$$\tau_{yx}{}^{1/n_{CG}} = \tau_{0CG}{}^{1/m_{CG}} + k_{CG}\dot{\gamma}_{yx}{}^{1/m_{CG}} \quad (4)$$

onde τ_{0C} e τ_{0CG} correspondem à tensão mínima de escoamento, k_C e k_{CG} tem unidades de viscosidade, m_{CG} é o índice da lei da potência e n_{CG} é um parâmetro adimensional para expoente da tensão de cisalhamento.

- **Herschel Bulkley**

O modelo de três parâmetros de Herschel-Bulkley é uma generalização da lei da potência, pois considera apenas uma tensão a cisalhamento nulo, τ_{0HB}.

$$\tau_{yx} = \tau_{0HB} + k_{HB}\dot{\gamma}_{yx}{}^{n_{HB}} \quad (5)$$

- **Carreau-Yasuda**

O modelo de Carreau contém quatro parâmetros para descrever tanto a região newtoniana quanto a região de alto cisalhamento.

$$\frac{\eta(\dot{\gamma}) - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{\lfloor 1 + (\lambda\dot{\gamma})^2 \rfloor^{(1-n_c)/2}} \quad (6)$$

onde η_0 é a viscosidade à taxa de cisalhamento nula e η_∞ é a viscosidade à taxa de cisalhamento infinita. O parâmetro λ tem unidade de tempo e é considerado o tempo de relaxação do material.

3.1.2 Estimação de parâmetros dos modelos

A estimação de parâmetros das equações constitutivas consideradas foi feita utilizando as ferramentas de estimação não linear do *software* Statistica7. O ajuste foi realizado utilizando o método de mínimos quadráticos para cálculo dos resíduos mínimos, utilizando Levenberg-Marquard como método de otimização, com critério de

convergência de 10^{-6}. Para os modelos com maior número de parâmetros foi necessário alterar o número máximo de iterações utilizadas para quinhentos, sendo que o valor padrão do *software* é para este parâmetro do método cinquenta.

As estimações foram feitas para cada um dos conjuntos de dados apresentados por Pangalos (1983), os quais descrevem tintas com uma gama de composições bem variada, que é representativa daquela correspondentes às tintas comercializadas para processos de impressão *offset*.

3.2 Plataforma para implementação do modelo

Considerando fatores como disponibilidade, flexibilidade para implementação de novos modelos e tipos de escoamento e experiência prévia do grupo de pesquisa, a plataforma escolhida para esta análise preliminar foi o pacote de CFD OpenFoam. O OpenFoam é um *software* de CFD de código aberto desenvolvido por Weller e Jasak (1993), que tem sido utilizado e aperfeiçoado por diversas pessoas ao redor do mundo. Sua estrutura lógica é montada em cima de linguagem orientada a objeto C++. Foi concebido para resolver equações diferenciais que envolvam campos vetoriais e tensoriais, contando atualmente com uma grande biblioteca de *solvers* para a resolução diferentes tipos e condições de escoamentos com base na resolução de sistemas de equações constituídos pelos balanços de quantidade de movimento e de massa e pela equação constitutiva a ser utilizada. Com relação a este último aspecto cabe ressaltar que o pacote já contém implementadas equações constitutivas viscoelásticas (Favero et al., 2010), o que pode ser importante numa etapa futura do trabalho, como descrito anteriormente.

O trabalho realizado nesta etapa do trabalho consistiu em identificar *solvers* disponíveis no OpenFoam com potencial para simulação do problema estudado e identificar que limitações e, consequentemente, que tipos de modificações deveriam ser realizadas nestes *solvers* para adequá-los à resolução do problema em questão.

4 Resultados

4.1 Estudo da adequação de equações constitutivas na representação da resposta viscosa de tintas de impressão

Nesta seção, são apresentadas tabelas com os resultados de ajuste dos parâmetros para as 19 tintas do trabalho de Pangalos (1983), para cada um dos modelos estudados.

Os valores em negrito são aqueles que apresentam nível de significância maior que 95%, pelo teste *t-student.* As linhas cujos valores não são apresentados correspondem aos casos nos quais não se conseguiu convergência na estimação dos parâmetros do modelo considerado. Nas refreridas tabelas também é apresentado um valor designado como "Média" que representa a média do desvio padrão obtida considerando os valores de desvio padrão do parâmetro considerado para cada tipo de tinta em que o parâmetro mostrou ser significativo pela aplicação dos teste *t*.

A **Tabela 1** apresenta os resultados da estimação para o modelo de Casson (4) generalizado. O parâmetro que apresentou melhores resultados de significância foi o m_{cg}. Sete dos dez valores passaram no teste de convergência, e a média dos desvios-padrão é a menor.

Tabela 1: Resultados de parâmetros preditos para o modelo de Casson generalizado

	τ_{0CG} ±	%dp	m_{CG} ±	%dp	k_{cg} ±	%dp	n_{cg} ±	%dp
Tinta1	**3,60 0,41**	**11,3%**	**0,89 0,12**	**13,0%**	**5,15 1,50**	**29,1%**	**0,78 0,11**	**13,7%**
Tinta2	**1,87 0,60**	**32,1%**	**1,20 0,20**	**16,5%**	26,24 15,74	60,0%	**1,17 0,21**	**17,6%**
Tinta3	- -	-	- -	-	- -	-	- -	-
Tinta4	- -	-	- -	-	- -	-	- -	-
Tinta5	- -	-	- -	-	- -	-	- -	-
Tinta6	- -	-	- -	-	- -	-	- -	-
Tinta7	0,06 0,12	186,2%	2,33 1,01	43,4%	5,11 4,14	81,1%	2,41 1,12	46,2%
Tinta8	**32,41 2,62**	**8,1%**	**1,09 0,06**	**5,2%**	**34,69 10,19**	**29,4%**	**0,89 0,06**	**6,8%**
Tinta9	**3,94 1,07**	**27,2%**	**2,01 0,33**	**16,4%**	**1,41 0,51**	**36,2%**	**2,08 0,51**	**24,4%**
Tinta10	- -	-	- -	-	- -	-	- -	-
Tinta11	- -	-	- -	-	- -	-	- -	-
Tinta12	- -	-	- -	-	- -	-	- -	-
Tinta13	424,68 1564,85	368,5%	**1,83 0,45**	**24,6%**	7,10 25,54	359,6%	1,3388 1,129	84,3%
Tinta14	1,79E+03 1,08E+03	60,4%	**1,05 0,11**	**10,7%**	2,22E+03 3,50E+03	157,2%	**0,60 0,11**	**18,1%**
Tinta15	526,30 4,96E+06	942203,3%	7,4688 7537	100912,6%	14,25 5,46E+04	383099,7%	2,04 2,50E+03	122499,0%
Tinta16	- -	-	- -	-	- -	-	- -	-
Tinta17	- -	-	- -	-	- -	-	- -	-
Tinta18	**62,53 3,94**	**6,3%**	**1,02 0,03**	**3,3%**	**145,23 36,69**	**25,3%**	**0,79 0,04**	**4,5%**
Tinta19	2,54 15,46	609,3%	2,02 1,13	56,3%	0,43 4,70	1100,5%	9,38 65,89	702,8%
t-student $_{0,95}$	**5/10**		**7/10**		**4/10**		**6/10**	
Média		**17,00%**		**12,8%**		**30,0%**		**14,18%**
Convergência				**10/19**				

Na **Figura 4-1**, a curva gerada para o modelo predito de Casson generalizdo para a tinta n° 18. Os pontos experimentais estão representados por círculos.

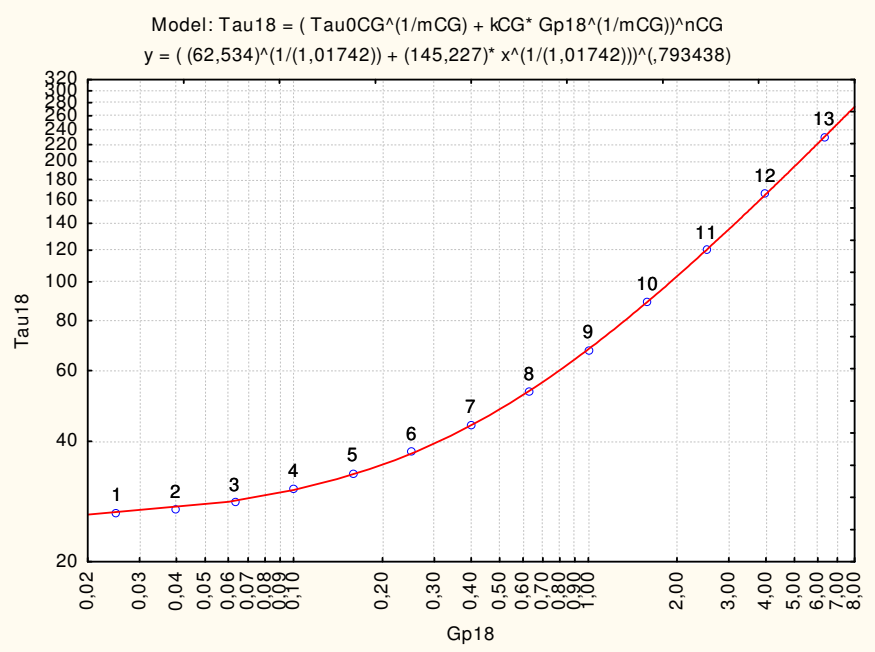

Figura 4-1: τ [Pa] *versus* taxa de cisalhamento [s^{-1}] para modelo predito Casson generalizado (tinta18), escalas logarítmicas.

A **Tabela 2** apresenta os resultados da estimação para o modelo de Herschel-Bulkley (5). O parâmetro que apresentou melhores resultados de significância foi o n_{HB}. Dezesseis dos dezoito valores passaram no teste t, e a média dos desvios-padrão é a menor.

Tabela 2: Resultado de parâmetros preditos para o modelo de Herschel-Bulkley.

-	τ_{0HB} ±	%desvio	k_{HB} ±	%desvio	n_{HB} ±	%desvio
Tinta1	**2,697 0,116**	**4,29%**	**3,320 0,044**	**1,32%**	**0,893 0,003**	**0,33%**
Tinta2	**3,113 0,244**	**7,83%**	**11,039 0,192**	**1,74%**	**0,911 0,006**	**0,61%**
Tinta3	**2,325 0,196**	**8,42%**	**46,224 0,270**	**0,58%**	**0,965 0,003**	**0,33%**
Tinta4	**0,786 0,190**	**24,17%**	**10,413 0,141**	**1,35%**	**0,949 0,004**	**0,45%**
Tinta5	**0,458 0,127**	**27,71%**	**2,494 0,042**	**1,68%**	**0,939 0,004**	**0,40%**
Tinta6	**0,624 0,084**	**13,44%**	**9,215 0,062**	**0,68%**	**0,946 0,002**	**0,23%**
Tinta7	**0,884 0,149**	**16,82%**	**58,070 0,233**	**0,40%**	**1,001 0,003**	**0,29%**
Tinta8	**16,738 0,260**	**1,55%**	**21,684 0,274**	**1,26%**	**0,843 0,005**	**0,55%**
Tinta9	**6,152 0,458**	**7,45%**	**5,688 0,242**	**4,26%**	**0,864 0,011**	**1,23%**
Tinta10	**4,165 0,278**	**6,68%**	**14,691 0,228**	**1,55%**	**0,884 0,005**	**0,56%**
Tinta11	**17,708 0,353**	**1,99%**	**162,271 0,492**	**0,30%**	**0,873 0,004**	**0,51%**
Tinta12	**3,543 0,496**	**14,01%**	**19,865 0,494**	**2,49%**	**0,899 0,009**	**1,02%**
Tinta13	**83,908 1,554**	**1,85%**	**28,886 1,898**	**6,57%**	**0,599 0,023**	**3,85%**
Tinta14	7,06E+05 5,19E+08	73451,01%	-7,06E+05 5,19E+08	-73466,71%	0 0	-
Tinta15	9,62E+02 1,12E+04	1162,93%	-698,440 1,11E+04	-1590,78%	-0,046 0,75	-1637,31%
Tinta16	**34,151 0,501**	**1,47%**	**40,112 0,706**	**1,76%**	**0,852 0,009**	**1,11%**
Tinta17	**17,744 0,992**	**5,59%**	**11,656 0,694**	**5,96%**	**0,843 0,017**	**1,97%**
Tinta18	**23,769 0,331**	**1,39%**	**44,345 0,467**	**1,05%**	**0,835 0,006**	**0,67%**
Tinta19	- -	-	- -	-	- -	-
t-student $_{0,95}$	**16/18**		**16/18**		**16/18**	
Média		**9,04%**		**2,06%**		**0,88%**
Convergência			**18/19**			

Na **Figura 4-2** os pontos experimentais para a tinta oito e a curva predita para o modelo de Herschel-Bulkley.

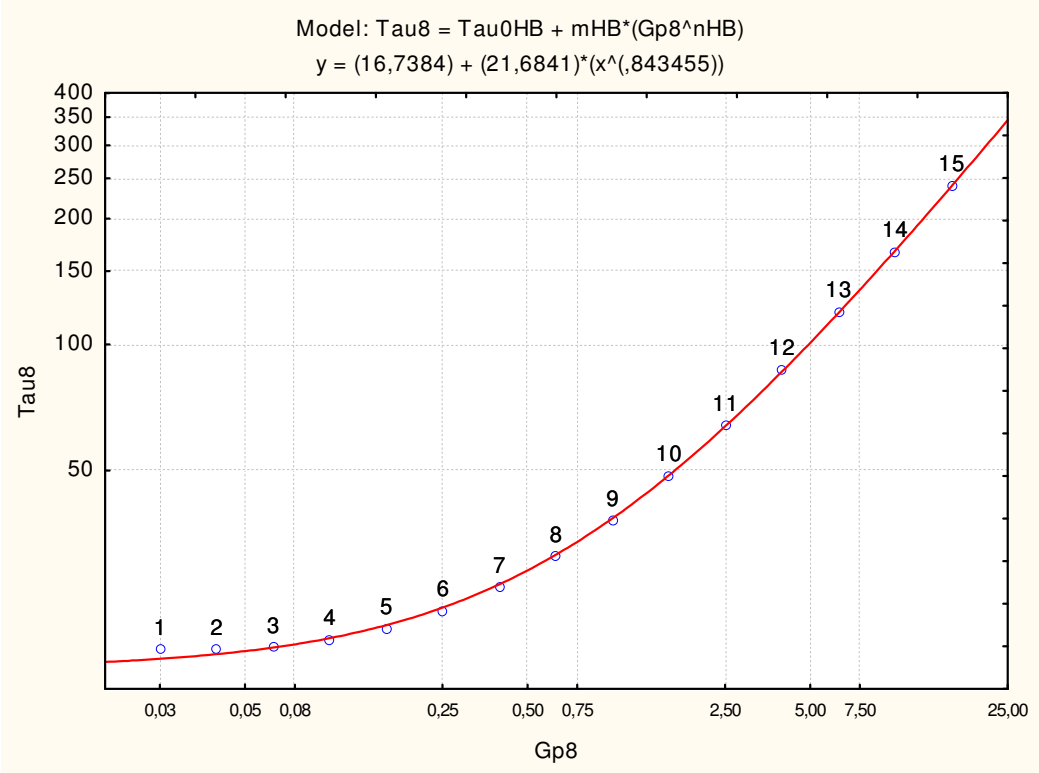

Figura 4-2: τ [Pa] *versus* taxa de cisalhamento [s^{-1}] para modelo predito Herschel-Bulkley (tinta8), escalas logarítmicas.

A **Tabela 3** apresenta os resultados da estimação para o modelo de Bingham (2). O parâmetro que apresentou melhores resultados de significância foi o k_B. Todos passaram no teste t, e a média dos desvios-padrão é a menor.

Tabela 3: Resultado de parâmetros preditos para o modelo de Bingham.

-	τ_{0B} ±	%desvio	k_B ±	%desvio
Tinta1	4,953 0,772	15,59%	2,058 0,026	1,27%
Tinta2	5,440 0,766	14,08%	8,376 0,095	1,13%
Tinta3	3,799 0,468	12,32%	43,421 0,207	0,48%
Tinta4	2,142 0,471	22,01%	8,884 0,058	0,66%
Tinta5	1,573 0,405	25,73%	1,901 0,014	0,72%
Tinta6	1,890 0,424	22,44%	7,785 0,052	0,67%
Tinta7	0,845 0,098	11,60%	58,151 0,066	0,11%
Tinta8	22,000 1,567	7,12%	14,260 0,297	2,08%
Tinta9	9,370 1,090	11,63%	3,297 0,057	1,72%
Tinta10	8,016 1,224	15,27%	10,240 0,151	1,48%
Tinta11	25,102 1,785	7,11%	151,857 2,763	1,82%
Tinta12	6,885 1,088	15,81%	15,180 0,206	1,36%
Tinta13	97,550 3,107	3,19%	9,610 0,589	6,13%
Tinta14	78,765 2,593	3,29%	43,253 1,750	4,05%
Tinta15	133,503 2,207	1,65%	399,673 16,731	4,19%
Tinta16	39,248 1,439	3,67%	30,715 0,638	2,08%
Tinta17	22,997 1,774	7,72%	6,658 0,143	2,14%
Tinta18	30,002 1,713	5,71%	32,915 0,759	2,31%
Tinta19	101,584 2,036	2,00%	602,343 15,435	2,56%
t-student $_{0,95}$	**19/19**		**19/19**	
Média		**10,94%**		**1,94%**
Convergência		**19/19**		

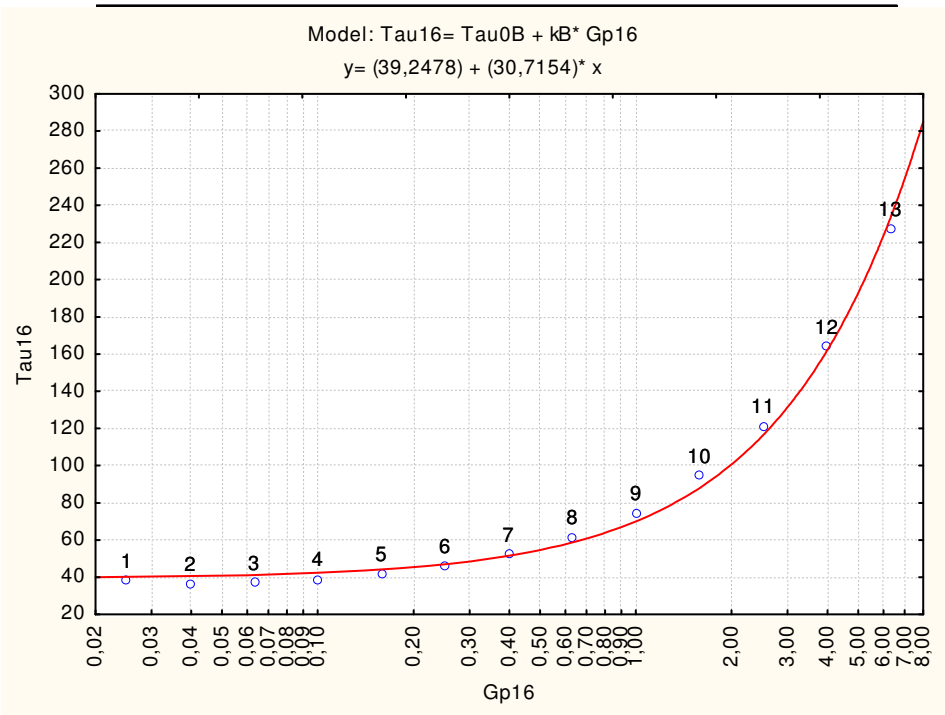

Figura 4-3: τ [Pa] *versus* taxa de cisalhamento [s^{-1}] para modelo predito de Bingham (tinta16). Abscissa em escala logarítmica.

A **Tabela 4** apresenta os resultados da estimação para o modelo de Carreau-Yasuda (6). O parâmetro que apresentou melhores resultados de significância foi o η_0. Nove dos dezenove passaram no teste t, e a média dos desvios-padrão é a menor.

Tabela 4: Resultado de parâmetros preditos para o modelo de Carreau-Yasuda.

	η_0 ±	%desvio	λ ±	%desvio	n_c ±	%desvio
Tinta1	**114,56 11,84**	**10,33%**	39,29 3,00	7,63%	0,107 0,055	51,68%
Tinta2	**139,50 14,52**	**10,41%**	**59,37 9,27**	**15,61%**	**0,405 0,055**	**13,50%**
Tinta3	**138,61 3,56**	**2,57%**	**107,81 32,46**	**30,11%**	**0,781 0,021**	**2,73%**
Tinta4	**29,02 0,30**	**1,05%**	**60,50 16,34**	**27,02%**	**0,796 0,018**	**2,20%**
Tinta5	**5,69 0,00**	**0,03%**	**17,17 3,83**	**22,32%**	**0,820 0,012**	**1,52%**
Tinta6	**25,18 1,66**	**6,58%**	**84,41 22,11**	**26,19%**	**0,812 0,014**	**1,78%**
Tinta7	**75,94 1,15**	**1,51%**	**65,64 23,12**	**35,22%**	**0,944 0,006**	**0,63%**
Tinta8	984,52 141,72	14,40%	38,45 4,24	11,03%	-0,119 0,113	-95,14%
Tinta9	315,17 49,11	15,58%	39,18 4,15	10,60%	-0,104 0,106	-102,56%
Tinta10	**223,64 36,43**	**16,29%**	**55,93 9,33**	**16,68%**	**0,303 0,076**	**25,11%**
Tinta11	**1225,29 150,04**	**12,25%**	**63,97 12,64**	**19,76%**	**0,460 0,061**	**13,22%**
Tinta12	39,66 82,41	207,76%	2,76 8,18	296,48%	0,678 0,509	75,03%
Tinta13	4306,06 492,66	11,44%	34,82 2,22	6,38%	-0,162 0,070	-43,57%
Tinta14	3820,13 532,04	13,93%	36,94 3,82	10,33%	-0,132 0,109	-82,41%
Tinta15	7755,75 1151,11	14,84%	38,32 7,50	19,56%	-0,082 0,198	-241,10%
Tinta16	2008,19 315,90	15,73%	38,50 4,89	12,71%	-0,147 0,136	-92,18%
Tinta17	864,75 114,83	13,28%	37,66 3,09	8,21%	-0,085 0,081	-94,70%
Tinta18	1390,61 195,46	14,06%	41,42 5,08	12,27%	0,004 0,104	2938,90%
Tinta19	5737,10 618,72	10,78%	42,15 6,73	15,96%	0,175 0,110	62,64%
t-student $_{0,95}$	**9/19**		**8/19**		**8/19**	
Média		**6,78%**		**24,11%**		**7,59%**
Convergência			**19/19**			

A viscosidade a cisalhamento zero (η_0) foi calculada separadamente, em uma etpa prévia à estimação dos demais parâmetros do modelo, a partir do platô de viscosidade observado nas regiões de baixa deformações. Desta forma o modelo a ser predito contém um grau de liberdade a menos, e se obteve melhores resultados de convergência.

Para este modelo, a viscosidade à taxa de cisalhamento infinito (η_∞) foi considerada zero, o que é um procedimento usual para polímeros fundidos e soluções poliméricas concentradas (BIRD, 1987). Na **Figura 4-4** a viscosidade *versus* taxa de cisalhamento para a tinta 5. Este modelo foi o único apresentado em termos de viscosidade, pois esta é a variável explicita do modelo.

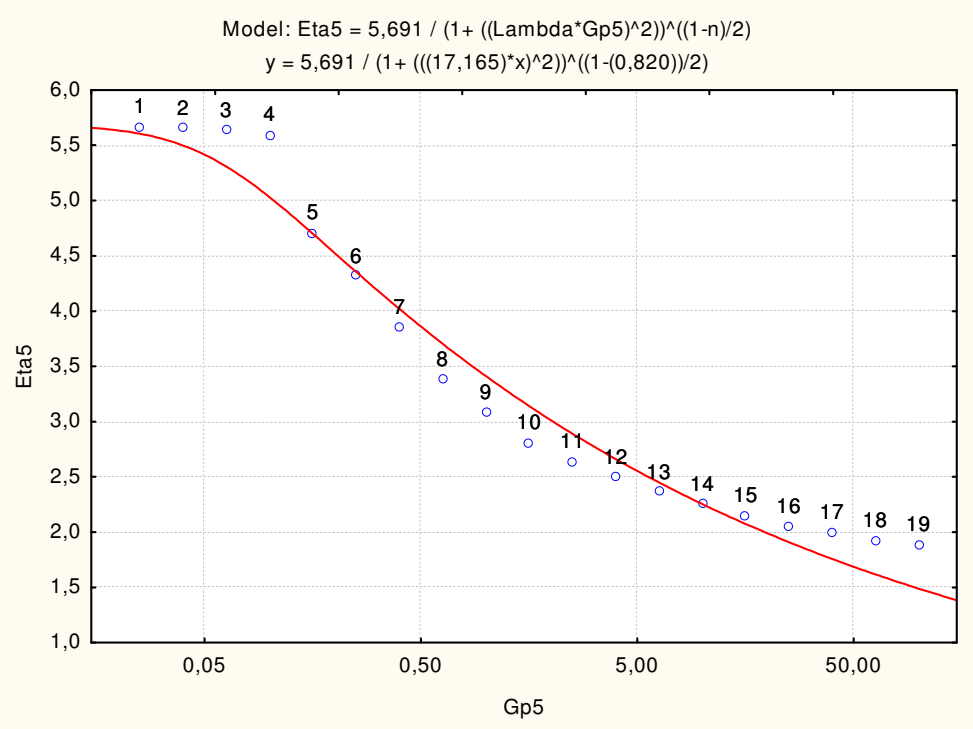

Figura 4-4: η [Pa.s] *versus* taxa de cisalhamento [s^{-1}] para modelo predito Carreau-Yasuda (tinta5). Abscissa em escala logarítmica.

A análise da **Figura 4-4** mostra também que a utilização de η_∞=0 força o comportamento assintótico da curva para zero e desvia as predições do modelo do comportamento observado experimentalmente. Portanto, seria adequado estimar também o valor deste parâmetro, o qual não foi possível com o conjunto de dados disponíveis, sendo verificadas dificuldades de convergência com a redução do número de graus de liberdade causada pela adição deste parâmetro. Além disso, as predições do modelo também não reproduzem o comportamento de viscosidade constante no extremo de baixas deformações, o que pode ser reflexo da influência da viscoplasticidade, sugerindo que o modelo não adequado para descrever a curva completa de viscosidades.

A **Tabela 5** apresenta uma comparação entre os quatro modelos analisados. Como são dezenove tintas, perfazendo dezenove conjuntos de dados experimentais, na linha da tabela designada como “convergência” está indicado o úmero de casos para os quais obteve-se convergência com o modelo considerado.

Para os modelos que convergiram, foi aplicado o *t-student* sendo apresentado quantos dos modelos que convergiram passaram no teste de significância. Por último, a média dos desvios padrão foi feita apenas nos modelos que convergiram e apresentaram nível de significância maior que 95%.

Tabela 5: Comparação da estimação dos parâmetros para as quatro equações analisadas.

-	Carreau Yasuda	Bingham	Casson generalizado	Herschel Bulkley
n° parâmetros	3	2	4	3
Convergência	19/19	19/19	10/19	18/19
t-student $_{0,95}$	25/57	38/38	22/40	48/54
Média desvios	12,83%	6,44%	18,49%	3,99%

Para os casos nos quais todos os modelos convergiram na etapa de estimação de parâmetros, observou comportamentos similares nos desvios das predições dos modelos com relação aos dados experimentais, sendo que estes comportamentos são apresentados na **Figura 4-5** para os dados da Tinta 1, a título de exemplo.

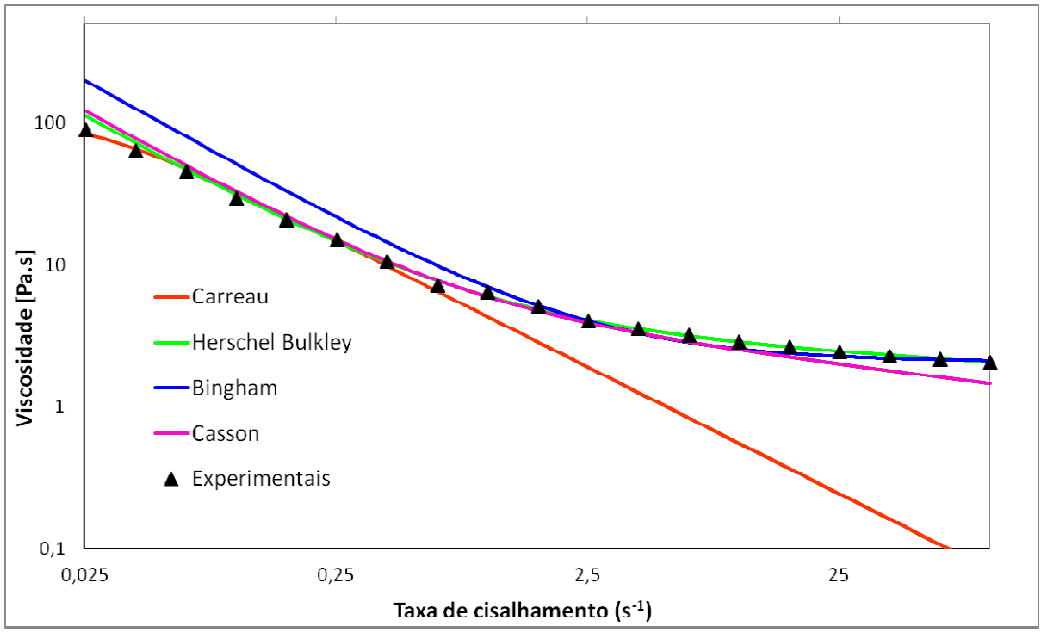

Figura 4-5: Valores preditos e valores experimentais para a tinta1. Escalas logarítmicas.

Conforme o demonstrado na **Tabela 5** é possível visualizar na **Figura 4-5** que os modelos de Bingham e de Herschel-Bulkley representam melhor os pontos experimentais, sendo que a qualidade dos parâmetros estimados para o modelo de Herschel-Bulkley foi maior.

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que o modelo viscoplástico de Herschel-Bulkley foi o que representou de maneira mais adequada os dados experimentais de reômetricos disponíveis para as tintas de impressão estudadas, indicando que a consideração da natureza viscoplástica da tinta é relevante na representação da curva completa de escoamento, se bem este parâmetro provavelmente não tenha influência significativa na zona de separação do *nip* de impressão, que se caracteriza por elevados valores de deformação e tensão.

4.2 Estudos preliminares sobre a utilização do OpenFoam como plataforma para implementação do modelo

A partir de uma etapa inicial na qual foram estudados diferentes *solvers* disponibilizados no OpenFoam, identificou-se os *solvers* interDyMFoam e icoDyMFoam como aqueles que apresentam maior potencial para serem utilizados como base para simulação do caso de transferência de tinta na impressora, devido às suas características com relação ao tipo de escoamento considerado e ao tipo de malha utilizado. Nas Seções 4.2.1 e 4.2.2 são discutidas brevemente as características identificadas nestes *solvers* e a análise de algumas limitações observadas em cada um deles com relação à sua utilização para a simulação do processo de impressão *offset*.

4.2.1 icoDyMFoam

As características mais relevantes identificadas neste *software* com relação à sua adequação para representação do problema de impressão *offset* são a utilização de um domínio móvel para resolução das equações diferenciais parciais e a possibilidade de prescrever condições de contorno de velocidade fixa sobre um contorno móvel. Estas duas características são apropriadas para representação do escoamento elongacional da

terceira zona do *nip* de impressão, de acordo às características do domínio de modelagem descrita na **Figura 2-7** (Seção 2.2).

A **Figura 4-6** apresenta um exemplo de escoamento que descreve o movimento de um cone móvel em contato com um líquido contido em uma região fechada, do tempo inicial até final de simulação, com a representação da malha e do gradiente de pressão.

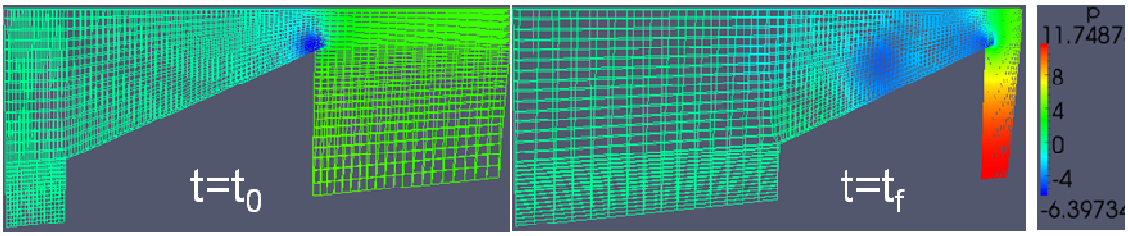

Figura 4-6: Exemplo cone móvel resolvido pelo icoDyMFoam. Pressão em atm.

Além de efetuar simulações de teste com o referido exemplo, disponível nas bibliotecas de ajuda do pacote OpenFoam, efetuou-se também uma etapa mas detalhada de identificação seus arquivos de definição de malhas, condições de contorno e definição das propriedades do fluido. Através deste estudo, identificou-se como principal limitação deste *solver* para sua aplicação ao problema de interesse, o fato de não ter implementada a resolução para sistemas multifásicos. Se bem este fato impossibilitou seu uso direto neste trabalho, a modificação deste *solver* para o tratamento de escoamentos multifásicos para considerar a interface tinta/ar aparece como alternativa interessante para o desenvolvimento de um simulador para o processo de impressão *offset*.

4.2.2 interDyMFoam

Este *solver* é utilizado para análise de alguns escoamentos multifásicos. Tem implementado em seu código o método VOF para acompanhar a evolução no tempo de superfícies de contato entre fluidos diferentes, como, por exemplo, entre um líquido e ar. A variável adimensional *gamma* (γ) representa o preenchimento da malha com um dos dois fluidos e varia da seguinte forma:

$$\begin{cases} \gamma = 0 \; ar \\ 0 < \gamma < 1 \; interface \\ \gamma = 1 \; líquido \end{cases} \quad (7)$$

A **Figura 4-7** apresenta um exemplo de escoamento no qual uma quantidade de água escoa por gravidade em contato com ar, resolvido através do interDyMFoam.

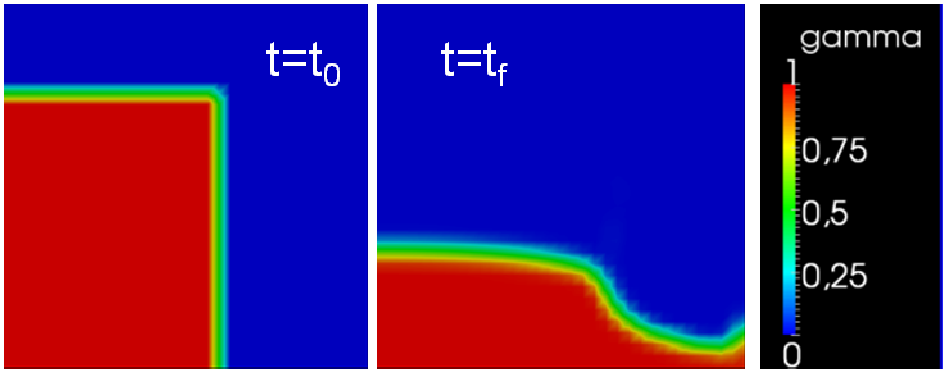

Figura 4-7: Exemplo de água escoando por gravidade. interDyMFoam.

Este exemplo também está disponível no banco de exemplos da biblioteca do OpenFoam. No tempo $t=t_0$ uma quantidade de água (em vermelho) está parada e com o passar do tempo de simulação passa a escoar por gravidade através de uma superfície livre, em contato com o ar (em azul). Para resolver esta condição de contorno, este *solver* utiliza a função *gamma* para o volume de fluido ocupado. Esta condição de contorno é semelhante ao caso da terceira zona do *nip* de impressão, e deve ser utilizada nas superfícies da malha nas quais não estão em contato com as placas móveis do modelo (ver **Figura 2-16**). No entanto, observou-se como sua principal limitação para a aplicação de interesse o fato de não permitir o uso domínios móveis e, conseqüentemente, da imposição de condições de contorno sobre uma superfície móvel. Assim, também neste caso, seria necessária a modificação do código original do *solver* a fim de adaptá-lo aos requerimentos da modelagem desejada.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

A partir do estudo feito na literatura foi possível identificar a terceira zona do *nip* de impressão como o aspecto fundamental a ser considerado em um simulador para o processo de impressão *offset*, bem como conhecer os princípios básicos utilizados na modelagem desta etapa do processo.

Através da análise dos dados experimentais de viscosidade de uma ampla faixa de composição das tintas, mostrou-se mais adequada para representação da pseudoplasticidade a equação constitutiva de Herschel-Bulkley, apesar deste modelo apresentar restrições quanto à representação da resposta viscoelástica. Portanto, sugere-se que o modelo de Herschel-Bulkley seja utilizado para modelar a segunda zona do *nip* de impressão, onde as altas taxas de cisalhamento fazem com que predominem a resposta viscosa do material.

Os estudos preliminares feitos do pacote OpenFoam permitem afirmar que o modelo do *nip* de impressão, mais precisamente a terceira zona é possível de ser implementado nesta plataforma, e desenvolver um simulador que faça predições sobre o comportamento das diferentes tintas em diferente condições de processo. Para tanto, serão necessárias modificações nos códigos de algum dos dois *solvers* citados neste trabalho, a fim de agregar todas as ferramentas necessárias para resolução desta problemática.

Para trabalhos futuros, visando o desenvolvimento de um simulador para o processo de impressão *offset*, os seguintes aspectos deverão ser considerados: 1) adequação dos solvers disponíveis no OpenFoam para aplicação no problema em questão; 2) realização de experimentos em reômetro rotacional para obter dados de elasticidade e analise de qual equação constitutiva pode representar adequadamente o comportamento das tintas de impressão; 3) incorporação no modelo equações constitutivas viscoelásticas; 4) considerar a possibilidade de uma não-isotérmica, pela incorporação do balanço de energia, considerando a dissipação viscosa e a variação da viscosidade com a temperatura.

6 Referências

[1] G.C Pangalos. The Rheological Properties of Letterpress and Lithographic Inks. McGill University, 1983.

[2] T. J. Craig. Characteristics of Printg Ink Films. TAGA Proceedings, 1960, pg 55.

[3] J. Mac Pnee. An Engineer' s Analysis of the Lithographic Printing Process. TAGA Proceedings, Technical Association of the Graphic Arts. Rochester, N.Y (1979), pg.237.

[4] Huang, W.X., Lee, S.H., Sung, H.J., Lee, T.M., Kim, D.S., 2008. Simulation of liquid transfer between separating walls for modeling micro-gravure–offset printing.Int. J. Heat Fluid Flow. 29, 1436–1446.

[5] Ahn, S., Lee, S., Na, Y., 2008a. On the fluid mechanics of ink transfer in gravure printing. Proceeding of 1st International Conference on R2R Printed Electronics.

[6] C.A. Powell, M.D. Savage. Computational simulation of the printing of Newtonian liquid from a trapezoidal cavity. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow.Vol. 12 No. 4, 2002, pp. 338-355

[7] Voet, Andries. Ink And Paper In the Printing Process. New York: Interscience, 1952.

[8]FOGRA,http://www.fogra.org/en/fogra-standardization/fogra-haracterizationdata/a-icc-en.html. Acessado em 10/11/2011

[9] J. Voltaire. Ink Film Splitting Acoustics and Tack on Paper in Offset Printing. Royal Institute of Technology, Suécia 2004.

[10] Danial N. Hohne, Hsien-Yeh Chen, Joerg Lahann, Michael J. Solomon, Near-surface structure of lithographic ink–fountain solution emulsions on model substrates. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 326 (2008) 138–146

[11] E.K. Gatcombe. Lubrication Characteristics of Involute Spur Gears. Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs. 1945, Vol. 67, p.177.

[12] W.H. Banks, C.C. Mill. Some Observations on the Behavior of Liquids Between Rotating Rol1ers. Proc. Roy. Soc. London A, (1954) Vol. 223, p. 414.

[13] F. Dobbels, J. Mewins. Analysis of Nip Flow Operations Involving a Viscoelastic Roller. Katholleke Universtent Leuven, Belgum (1977).

[14] D. H. Ahmed, H. J. Sung. Simulation of non-Newtonian ink transfer between two separating plates for gravure-offset printing. International Journal of Heat and Fluid Flow 32 (2011) 298–307

[15] M.E. Fernandez, M.E. Munoz, A. Santamaria, R. Azaldegui, R. Diez, M. Pelaez. Rheological analysis of highly pigmented inks: flocculation at high temperatures, Journal of Rheology 42 (2) (1998) 239–253.

[16] A. Voet. Ink and Paper in the Printing Process. Interscience Publishers, N.Y (1952).

[17] C. Weisbecker, R. Durand, G. Pace. Lithographic offset ink rheology related to sensory descriptions of appearance and handling. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 93 (2008) 20–26.

[18] J.L. Favero. Simulação de escoamentos viscoelásticos: Desenvolvimento de uma metodologia de análise utilizando o software OpenFoam e equações constitutivas diferenciais. Dissertação de Mestrado. DEQUI-UFRGS (2009).

[19] FAVERO, J.L. ; Secchi, A.R. ; Cardozo, N.S.M. ; JASAK, H. . Viscoelastic flow analysis using the software Open FOAM and differential constitutive equations. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics (Print), v. 165, p. 1625-1636, 2010.

[20] ABITIM, http://www.abitim.org.br/01_comsumo%20brasileiro.htm. Acessado em 20/10/2011.

[21] R.B. Bird *et al*. Transport Phenomena, second edition. John Wiley & Sons, INC. (2002)

[22] R.P. Chhabra, *J.F. Richardson*. Non-Newtonian Flow and Applied Rheology, second edition. ChemE (2008)

[23] R.B.Bird. Dynamics of Polymeric Liquids, Vol 1 – Fluid Mechanics, second edition. John Wiley & Sons, INC. (1987)

[24] C. W. Macosko. Rheology Principles, Measurements and Aplications. Wiley-VCH, Inc (1994)

7 Anexos

7.1 Inkometer

Este dispositivo tem como finalidade principal simular impressora para estimar valores de tack da tinta para condições de impressão. A geometria do reômetro rotacional não permite o cálculo de forças de separação do filme de tinta.

Figura 7-1 *Inkometer*, fabricante K&N.

A Figura 7-1 demonstra este equipamento, que consiste em medir a força exercida no rolo superior através do controle de rotação do rolo intermediário.

7.2 Dados econômicos

Tabela 6: Consumo de tintas para impressão industrial no Brasil. (Fonte: ABITIM)

TINTAS PARA IMPRESSÃO - CONSUMO INKS FOR PRINTING																				
	EM MIL TONELADAS/IN THOUSANDS OF TONS														2011					
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	1º TRIM	2º TRIM	3º TRIM	4º TRIM	TOTAL
VENDAS NACIONAIS DOMESTIC SALES	38,6	40,0	43,5	54,2	54,3	59,5	58,9	58,0	54,3	67,0	75,7	80,3	88,7	93,4	85,9	93,1	20,8	21,8			42,6
IMPORTAÇÃO IMPORTS	6,0	8,6	11,0	13,5	12,7	15,2	17,1	14,0	11,7	14,0	15,1	15,5	15,4	17,4	15,9	20,1	5,1	4,7			9,8
CONSUMO BRASILEIRO BRAZILIAN CONSUMPTION	44,6	48,6	54,5	67,7	67,0	74,7	76,0	72,0	66,0	81,0	90,8	95,8	104,1	110,8	101,8	113,2	25,9	26,5	0	0	52,4

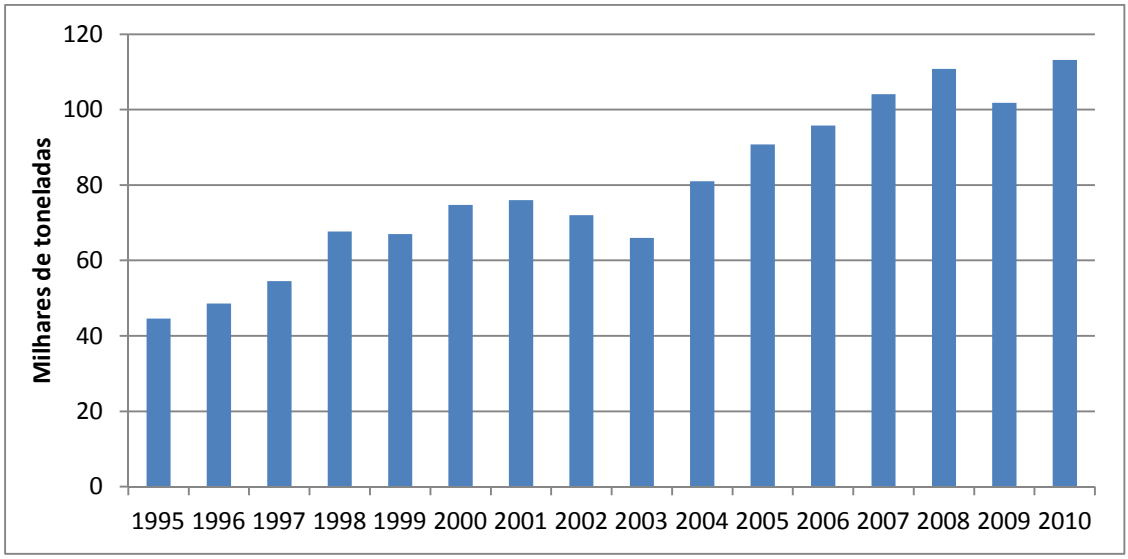

Figura 7-2: Consumo nacional de tintas para impressão. (Fonte: ABITIM)

Observa-se na **Figura 7-2** que nos últimos 15 anos o consumo das tintas para impressão segue uma tendência de crescimento. Isto é associado, principalmente à crescente demanda da indústria de embalagens.

7.3 Dados experimentais (PANGALOS,1983)

Gp1	Tau1	Gp2	Tau2	Gp3	Tau3	Gp4	Tau4	Gp5	Tau5	Gp6	Tau6	Gp7	Tau7	Gp8	Tau8	Gp9	Tau9	Gp10	Tau10	Gp11	Tau11	Gp12	Tau12	Gp13	Tau13	Gp14	Tau14	Gp15	Tau15	Gp16	Tau16	Gp17	Tau17	Gp18	Tau18	Gp19	Tau19
0,025	2,255	0,025	2,754	0,025	2,957	0,025	0,675	0,025	0,142	0,025	0,558	0,025	1,869	0,025	18,682	0,025	5,989	0,025	4,383	0,025	24,397	0,025	0,981	0,025	82,229	0,025	72,956	0,025	148,341	0,025	37,976	0,025	16,551	0,025	26,556	0,025	112,548
0,040	2,562	0,040	3,122	0,040	4,338	0,040	1,032	0,040	0,225	0,040	0,879	0,040	2,886	0,040	18,602	0,040	5,851	0,040	4,426	0,040	27,096	0,040	4,665	0,040	87,958	0,040	74,227	0,040	148,573	0,040	36,704	0,040	17,106	0,040	26,949	0,040	125,808
0,063	2,883	0,063	3,565	0,063	5,571	0,063	1,504	0,063	0,366	0,063	1,179	0,063	4,517	0,063	18,905	0,063	6,014	0,063	5,052	0,063	31,859	0,063	5,309	0,063	91,821	0,063	77,424	0,063	156,109	0,063	37,054	0,063	17,952	0,063	28,111	0,063	141,470
0,100	2,988	0,100	4,125	0,100	7,579	0,100	1,938	0,100	0,560	0,100	1,651	0,100	6,911	0,100	19,740	0,100	6,281	0,100	5,735	0,100	39,740	0,100	6,302	0,100	94,230	0,100	79,630	0,100	171,800	0,100	39,010	0,100	19,010	0,100	30,370	0,100	164,200
0,159	3,340	0,159	5,086	0,159	10,561	0,159	2,634	0,159	0,747	0,159	2,305	0,159	10,379	0,159	20,954	0,159	6,892	0,159	6,986	0,159	50,482	0,159	9,384	0,159	96,083	0,159	82,916	0,159	195,064	0,159	41,749	0,159	19,844	0,159	33,334	0,159	198,917
0,251	3,788	0,251	6,330	0,251	14,992	0,251	3,713	0,251	1,085	0,251	3,110	0,251	15,811	0,251	23,088	0,251	7,596	0,251	8,546	0,251	66,618	0,251	9,801	0,251	97,013	0,251	89,654	0,251	236,002	0,251	46,095	0,251	21,136	0,251	37,605	0,251	250,672
0,398	4,232	0,398	8,197	0,398	21,565	0,398	5,147	0,398	1,535	0,398	4,570	0,398	24,228	0,398	26,235	0,398	8,679	0,398	10,952	0,398	90,229	0,398	12,628	0,398	99,764	0,398	97,455	0,398	52,111	0,398	22,974	0,398	49,910				
0,631	4,549	0,631	10,778	0,631	31,449	0,631	7,824	0,631	2,137	0,631	6,727	0,631	37,380	0,631	31,108	0,631	10,115	0,631	14,090	0,631	125,506	0,631	17,176	0,631	103,673	0,631	113,706	0,631	61,832	0,631	25,593	0,631	53,149				
1,000	6,460	1,000	14,860	1,000	48,050	1,000	11,350	1,000	3,089	1,000	10,010	1,000	58,880	1,000	38,020	1,000	12,120	1,000	19,290	1,000	180,400	1,000	23,880	1,000	109,900	1,000	132,800	1,000	74,690	1,000	30,490	1,000	67,500				
1,585	8,182	1,585	20,716	1,585	74,717	1,585	16,801	1,585	4,460	1,585	15,145	1,585	92,786	1,585	48,594	1,585	15,259	1,585	29,650	1,585	260,257	1,585	33,444	1,585	123,139	1,585	155,679	1,585	94,450	1,585	42,177	1,585	89,156				
2,512	10,189	2,512	29,365	2,512	114,849	2,512	25,798	2,512	6,637	2,512	22,736	2,512	146,826	2,512	64,006	2,512	19,692	2,512	37,881			2,512	48,557	2,512	135,547	2,512	192,972	2,512	121,505	2,512	44,086	2,512	119,822				
3,981	14,260	3,981	42,477	3,981	177,553	3,981	39,412	3,981	9,953	3,981	34,858	3,981	232,490	3,981	87,224	3,981	26,099	3,981	54,500			3,981	72,056	3,981	149,646	3,981	240,413	3,981	163,858	3,981	56,371	3,981	165,371				
6,310	20,123	6,310	61,750	6,310	275,747	6,310	61,201	6,310	14,917	6,310	52,985			6,310	119,764	6,310	34,711	6,310	79,758			6,310	107,649	6,310	172,831			6,310	227,034	6,310	69,284	6,310	229,558				
10,000	28,700	10,000	92,270			10,000	93,710	10,000	22,530	10,000	82,000			10,000	167,000	10,000	47,940	10,000	115,400			10,000	160,900	10,000	195,800					10,000	95,340						
15,850	42,351	15,850	139,401			15,850	142,882	15,850	34,173	15,850	125,944			15,850	239,969	15,850	69,613	15,850	171,973			15,850	242,030	15,850	236,006					15,850	137,182						
25,120	61,594	25,120	211,988			25,120	223,191	25,120	51,622	25,120	195,157					25,120	97,340	25,120	258,987											25,120	196,488						
39,810	91,244					39,810	79,779									39,810	139,733													39,810	277,356						
63,100	136,422					63,100	121,657									63,100	212,331																				
100,000	205,500					100,000	189,300																														