



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



# Melhoria do controle do impresso em processos de rotogravura

*Autor: Mariane Vasquez*

*Orientador: Prof. Norberto Holz*

Porto Alegre, junho de 2012.



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



# Melhoria do controle do impresso em processos de rotogravura

Estudo apresentado como requisito parcial à  
obtenção do grau de Engenheiro Químico na  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Norberto Holz

Porto Alegre, junho de 2012.

## Sumário

Sumário	iii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	2
2.1 O Processo de Rotogravura	2
2.1.1 Componentes do Processo de Rotogravura	3
2.2 As Tintas	5
2.2.1 Composição Básica das Tintas	7
2.3 Tinta: Um Fluido Não Newtoniano	8
2.4 Viscosidade	9
2.4.1 Viscosidade Dinâmica x Viscosidade Cinemática	12
2.4.2 Influência da Temperatura na Viscosidade	12
2.5 Ganho de Ponto	13
2.5.1 Influência da Viscosidade no Ganho de Ponto	15
3 Materiais e Métodos	17
3.1 Medições das Variáveis de Entrada e Variável Resposta do Processo	17
3.2 Análise dos dados	19
4 Resultados	20
4.1 Análise da Amostragem	20
4.2 Solução Proposta	24
4.2.1 Procedimento de Cálculo	25
4.2.2 Determinação da Capacidade Térmica, Densidade e Condutividade Térmica da Tinta	27
4.2.3 Determinação da Área de Troca Térmica	28
4.2.4 Determinação da Queda de Pressão	29
4.2.5 Considerações Finais	31
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	32
6 Referências	33

---

## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus pais, José e Marisa Vasquez, por todo o apoio, força e motivação que me deram ao longo do curso.

Ao meu noivo, por todo carinho e compreensão.

Aos meus irmãos, amigos e parentes, por estarem juntos não só em momentos de descontração, mas também em momentos difíceis de nossas vidas.

Ao meu orientador, Prof. Norberto Holz, pelos conhecimentos transmitidos, dedicação e paciência.

Aos colegas de trabalho, por auxiliarem na execução desse trabalho com muita dedicação e empenho.

## Resumo

Este trabalho é um estudo sobre as influências das variáveis do processo de rotogravura de uma indústria gráfica no ganho de ponto do impresso, que é o crescimento aparente do ponto impresso devido a um maior escorrimento da tinta. Nesse processo, apesar de possuir variáveis limitadas, são desconhecidos os principais impactos dessas na qualidade do impresso.

Nesse processo de impressão, ocorre a transferência de tinta para o papel através de cilindros com gravações em baixo relevo. É natural desse processo que ocorra um ganho de ponto, porém é necessário que se conheça esse percentual e se saiba controlá-lo.

Foram realizados testes durante esse trabalho, analisando a influência das variáveis definidas no ganho de ponto. Como resultado, foi observada uma forte influência da viscosidade da tinta no ganho de ponto, a qual é correlacionada com a sua temperatura. Foi observado que conforme aumenta a temperatura da tinta, sua viscosidade diminui e, com isso, tem-se um maior ganho de ponto. O problema nesse processo consiste na alta variabilidade desse parâmetro e uma dificuldade de controle da viscosidade da tinta que, como já dito, interfere fortemente no ganho de ponto.

Para se garantir um maior controle no ganho de ponto, foi proposto à empresa a implementação de um trocador de calor bitubular, que pode também assumir o formato de serpentina, com a função de reduzir a temperatura da tinta, que estava acima do *range* teórico. Com isso, é possível garantir uma maior estabilidade no valor da viscosidade da tinta e melhoria da precisão da reprodução das imagens.

Além disso, foi criada uma planilha em Microsoft Excel capaz de projetar trocadores de calor bitubulares para outras tintas utilizadas no processo. Caso a empresa estudada necessite desses cálculos para futuras intervenções no processo, poderá utilizar essa mesma planilha.

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Modelo de impressora via rotogravura (Fonte: < <a href="http://www.bobst.com">http://www.bobst.com</a> >. Acesso em 15 de maio de 2012).....	3
<b>Figura 2.2:</b> Representação das unidades de impressão via rotogravura.....	4
<b>Figura 2.3:</b> Consumo de tintas no ano de 2005 (litros per capita) (Adaptado de Fazenda et al., 2009). .....	7
<b>Figura 2.4:</b> Deformação de um elemento fluido (Fox, 2006). .....	10
<b>Figura 2.5:</b> (a) Tensão de cisalhamento e (b) viscosidade aparente, como uma função da taxa de deformação para um escoamento unidimensional de vários fluidos não newtonianos (Fox,2006). .....	11
<b>Figura 2.6:</b> Variação da viscosidade dinâmica com a temperatura (em °C) (Fonte: Bastos, 1983). .....	13
<b>Figura 2.7:</b> Representação da influência da viscosidade no ganho de ponto para o tom magenta (Joshi, 2012).....	16
<b>Figura 2.8:</b> Representação da influência da viscosidade no ganho de ponto para o tom preto (Joshi, 2012). .....	16
<b>Figura 3.1:</b> Foto do microscópio digital utilizado nas análises.....	17
<b>Figura 3.2:</b> Representação do instrumento de medição de viscosidade Copo Zahn 2. ....	18
Fonte: (Adaptado de < <a href="http://www.byk.com">http://www.byk.com</a> >. Acesso em 19 maio 2012). .....	18
<b>Figura 4.1:</b> Viscosidade da tinta em função do ganho de ponto e suas respectivas imagens. ....	21
<b>Figura 4.2:</b> Carta de controle de valores individuais e amplitude móvel da temperatura da tinta.....	22
<b>Figura 4.3:</b> Resultados do teste de hipótese entre médias de ganho de ponto para diferentes lâminas de raspagem. ....	23
<b>Figura 4.4:</b> Resultados do teste de hipóteses entre variâncias de ganho de ponto para diferentes lâminas de raspagem. ....	23
<b>Figura 4.5:</b> Trocador de calor bitubular e escoamento paralelo.....	24
<b>Figura 4.6:</b> Procedimento para determinação da massa específica da tinta.....	27
<b>Figura 4.7:</b> Procedimento para determinação do calor específico da tinta. ....	28
<b>Figura 4.8:</b> Planilha de cálculo do Microsoft Excel® para trocador de calor bitubular. ....	29
<b>Figura 4.9:</b> Queda de pressão para tinta e água no trocador bitubular (Planilha do Microsoft Excel®). .....	31

---

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1:</b> Componentes do processo de rotogravura e suas funções. ....	4
<b>Tabela 3.1:</b> Tabela de conversão do tempo de escoamento ( $t$ em segundos) para centiStokes utilizando Copo Zahn. ....	18
<b>Tabela 3.2:</b> Classificação do coeficiente de correlação linear de Pearson. ....	19
<b>Tabela 4.1:</b> Resultados da amostragem do processo de rotogravura. ....	20
<b>Tabela 4.2:</b> Análise de correlação entre as variáveis de entrada e saída do processo. ....	21
<b>Tabela 4.3:</b> Análise de correlação entre temperatura e viscosidade da tinta. ....	22

## Lista de Símbolos

- A Área,  $m^2$
- $C_p$  Calor específico,  $J/(kg.K)$
- D Diâmetro, m
- $f$  Fator de atrito (adimensional)
- F Força, N
- $g$  Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
- $G$  Fluxo mássico do tubo ( $kg/m^2.s$ )
- $h$  Coeficiente de película,  $W/(m^2.K)$
- $k$  Condutividade térmica,  $W/m.K$
- L Comprimento, m
- $m$  Massa, kg
- $n$  Índice de comportamento do escoamento
- Nu Número de Nusselt
- Pr Número de Prandtl
- $q$  Taxa de transferência de calor, W
- Re Número de Reynolds
- $t$  Tempo, s
- T Temperatura, K
- $u$  Velocidade, m/s
- U Coeficiente de transferência de calor global,  $W/m^2.K$
- V Volume,  $m^3$
- W Vazão mássica, kg/s
- $x,y$  Coordenadas retangulares, m
- $\alpha$  Ângulo, rad
- $\delta$  Derivada parcial
- $\eta$  Viscosidade aparente

- $\mu$  Viscosidade dinâmica, kg/(s.m)
- $\nu$  Viscosidade cinemática, m<sup>2</sup>/s
- $\rho$  Massa específica, kg/m<sup>3</sup>
- $\sigma$  Derivada
- $\tau$  Tensão de cisalhamento, N/m<sup>2</sup>
- $\Delta P$  Queda de pressão (N/m<sup>2</sup>)
- $\Delta T$  Diferença de temperatura, K
- $\Delta T_{ml}$  Média logarítmica das temperaturas, K

## **1 Introdução**

A indústria gráfica está em constante crescimento no país, especialmente quando se trata do processo de rotogravura. Essa é uma técnica de impressão utilizada em processos de alta tiragem, que garante confiabilidade e qualidade dos impressos, além de uma menor complexidade de operação. Devido à alta competitividade no cenário atual, as indústrias devem assegurar a melhoria constante de seus processos, bem como a obtenção dos resultados esperados pelos clientes.

Quando se trata de qualidade de impressão, a precisão da reprodução dos pontos é muito relevante. A fim de garantir essa precisão, as indústrias gráficas que utilizam o processo de rotogravura precisam conhecer e saber controlar fatores como o ganho de ponto, que é o “espalhamento” da tinta no substrato enquanto a mesma é absorvida. É semelhante ao que ocorre quando se deixa cair um pingo de tinta nanquim ou de caneta num pedaço de papel: a tinta se espalha na medida em que vai sendo absorvida pelas fibras, e a mancha resultante é muito maior que o pingo original. Não sendo conhecido o comportamento desse parâmetro, muitos ajustes são realizados ao longo do processo produtivo resultando em uma alta variabilidade das imagens do impresso e, por vezes, desperdício de matéria-prima por falta de qualidade.

Esse trabalho tem como objetivo analisar as possíveis influências no processo de rotogravura em uma empresa que acarretam no descontrole do efeito ganho de ponto e, em alguns momentos, insatisfação dos clientes e estrago de produto. Ainda, o trabalho propõe alternativas para melhoria do processo.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 O Processo de Rotogravura

Rotogravura é o método de produção gráfica mais reconhecido. É comumente utilizado para produção de artes que requerem alto nível de qualidade, em altas velocidades, no que se refere à riqueza de cores. É bastante utilizado para produção de revistas, catálogos, embalagens flexíveis e embalagens cartonadas (Joshi, 2012).

A rotogravura é um sistema direto de reprodução gráfica, em que o substrato entra em contato com a fôrma de impressão, onde a imagem é gravada em baixo-relevo em um cilindro metálico e a transferência da tinta se dá através da pressão entre os cilindros e o substrato (SENAI, 2004).

Para Joshi (2012), o processo de rotogravura é a técnica de impressão mais confiável e eficiente e é conhecido pelas variáveis limitadas do processo de impressão. Estas variáveis limitadas, por sua vez, garantem uma melhor qualidade e controle da impressão ao longo da operação. A qualidade de impressão é caracterizada pela precisão com a qual a reprodução dos pontos impressos – que formam as imagens- tem lugar.

O processo de rotogravura possui claras vantagens econômicas quando comparado a outros processos de impressão de grande tiragem que requeira uniformidade de cores. Nesse processo é possível imprimir com alta qualidade de cores em uma grande variedade de materiais, como filme, papel alumínio, papéis leves ou espessos.

O sucesso do processo de rotogravura se dá à simplicidade do mesmo e ao elevado nível de qualidade de seus produtos. O processo possui menos variáveis a serem controladas, quando comparado com outros processos de impressão, o que permite uma maior constância ao longo do processo produtivo.

Na rotogravura, é utilizado o processo de gravação encavográfica (formação de células onde a tinta será depositada) nos cilindros os quais após imersão em banho de tinta transferem a mesma para o papel. A superfície do cilindro é raspada por uma lâmina de metal antes que o substrato entre em contato com o cilindro, fazendo com que apenas a tinta contida nas células seja transferida para o substrato. A lâmina de raspagem atua como um rodo, removendo a tinta da área onde não deve ocorrer a impressão. Cada centímetro quadrado de arte gravado no cilindro de impressão possui centenas de células gravadas em baixo relevo na sua superfície (90,000 por polegada quadrada). A densidade de cor especificada determina o tamanho e o número de células a serem gravadas (Gravure Education Foundation, 2003).

As máquinas de impressão via rotogravura são hoje altamente equipadas com diversos níveis de automação, incluindo controles de falhas, arquivamento dos trabalhos anteriores, estatísticas da produção, dados de análise de consumo de tinta e papel, além do registro de desperdícios da máquina, como demonstrado na Figura 2.1.



**Figura 2.1:** Modelo de impressora via rotogravura (Fonte: <<http://www.bobst.com>>. Acesso em 15 de maio de 2012).

A rotogravura é conhecida nas indústrias como líder de produção de imagens “vivas”, capaz de reproduzir detalhes, sombras, sendo muito valorizado por publicitários. O uso de um sistema de secagem a cada unidade de impressão permite uma maior “riqueza” das cores, já que o substrato alcançará a próxima unidade de impressão sempre seco. O contato direto do cilindro de impressão com o substrato garante uma deposição da tinta mais eficiente.

Esse processo é conhecido pela alta produtividade, uma vez que atinge até 3300 pés por minuto. Devido a essa alta velocidade de impressão, é escolhido um solvente com característica rápida de evaporação. Além disso, o tempo de vida de um cilindro pode alcançar até 3 milhões de impressões antes que seja necessário recromá-lo. Os cilindros de impressão são geralmente feitos de ferro ou alumínio, ocorrendo uma eletrodeposição de cobre para ocorrer a gravação com um cabeçote de diamante e após um banho de cromo para aumentar o tempo de vida da gravação (Gravure Education Foundation, 2003). As operações de preparação do cilindro para gravação ocorrem na indústria de galvanoplastia (Barbosa et al., 2009).

A formação da imagem na Rotogravura é realizada através de baixos relevos gravados no cilindro. Esses baixos relevos são chamados de alvéolos ou células, na verdade pequenos sulcos onde a tinta é depositada. Este cilindro é imerso num tanque com tinta que apresenta um alto grau de fluidez.

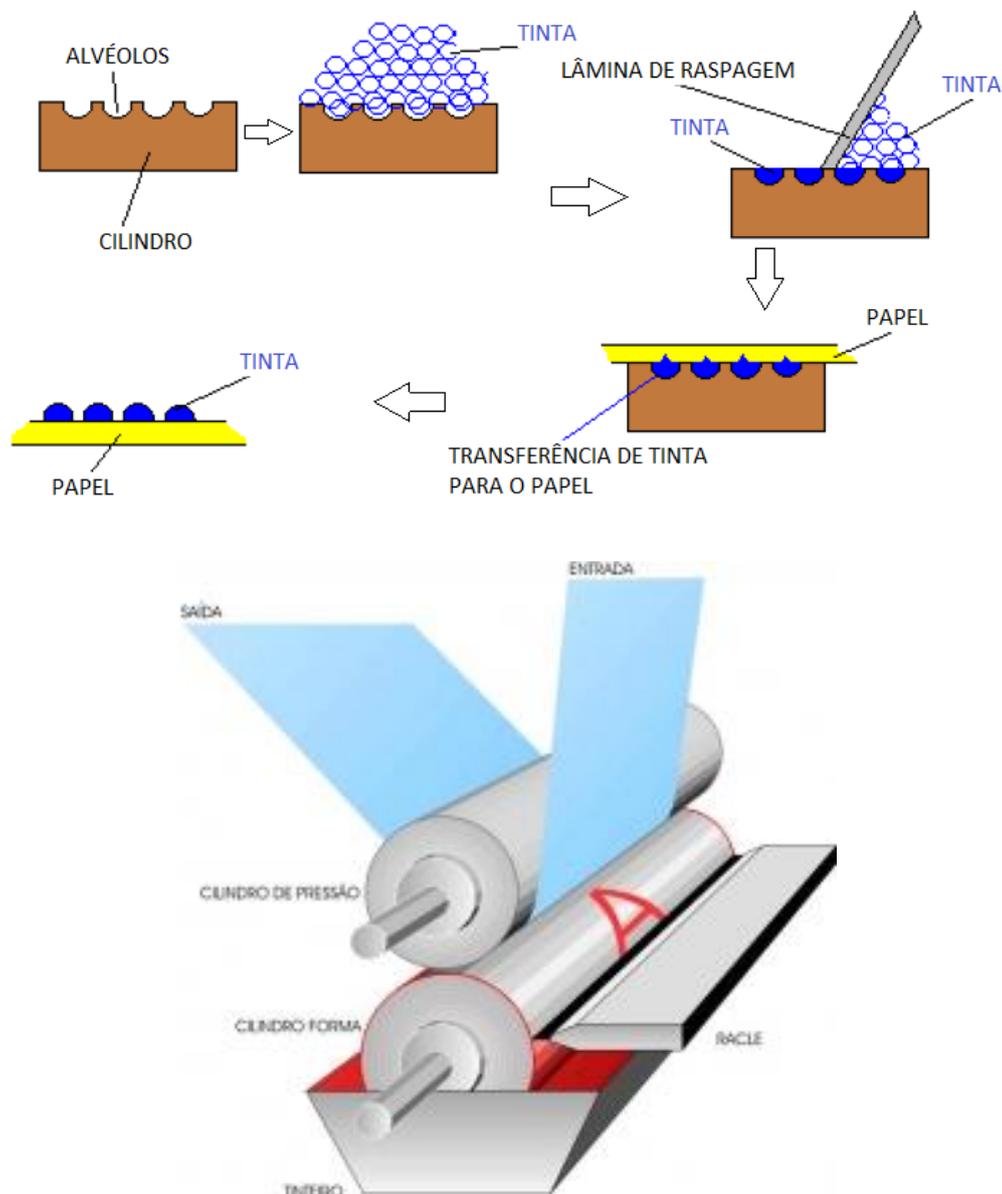
#### Componentes do Processo de Rotogravura

Segundo Gravure Education Foundation (2003) e SENAI (2004), o processo de rotogravura possui 5 unidades básicas, descritas na Tabela 2.1 e Figura 2.2.

**Tabela 2.1:** Componentes do processo de rotogravura e suas funções.

Unidade	Função
Cilindros	Armazenamento de tinta nos alvéolos que são gravados em baixo relevo possibilitando a transferência de imagem ao substrato.
Tinteiros	Reservatório de tinta posicionado abaixo do cilindro, onde este é mergulhado e seus alvéolos preenchidos de tinta.
Lâmina de raspagem	Lâmina que entra em contato com o cilindro antes que ocorra a impressão com a função de retirar o excesso de tinta das áreas de não impressão.
Rolo pressor	Cilindro de metal envolto de uma borracha que pressiona o substrato contra o cilindro de impressão a fim de garantir a transferência de tinta.
Estufas	Secadores regulados para remover o solvente da tinta, deixando apenas a parte sólida depositada sobre o substrato.

Fonte: Adaptado de Gravure Education Foundation (2003) e SENAI (2004).

**Figura 2.2:** Representação das unidades de impressão via rotogravura.

Além de possuir um número reduzido de unidades, o processo se torna econômico, pois necessita poucos operadores, em relação aos outros processos existentes, para controlar o processo de impressão.

Como o tipo de tinta utilizado na rotogravura apresenta um alto grau de fluidez, este sistema permite a impressão sobre suportes plásticos, resultando em uma grande aplicação na indústria de embalagens (SENAI, 2004).

## 2.2 As Tintas

Tinta é todo material aplicado sobre um suporte para produzir uma imagem de uma matriz. Estes materiais são transferidos da matriz ao suporte sobre o qual são fixados, originando o produto impresso. As tintas devem servir a uma larga variedade de necessidades de impressão: tipografia, rotogravura, *offset*, flexografia e serigrafia, para citar algumas. Elas devem também ser capazes de imprimir em diversas superfícies, como papel, cartão, plástico, folhas metálicas, vidro, têxteis, metal, etc. (Fazenda et al, 2009).

*Segundo Wismar (1984), "o valor da tecnologia de tintas e vernizes tem sido altamente subestimado em todos os sentidos; a grande maioria das pessoas que não esteja de alguma forma relacionada com tintas e correlatos, seguramente não se dá conta de que esta tecnologia envolve muitas ciências, tais como: química orgânica e inorgânica, química dos polímeros, eletroquímica, química de superfície, físico química, química dos colóides, etc. O porte da indústria de tintas no mundo ocidental é de US\$22 bilhões. Nós protegemos e embelezamos casas e edifícios, carros, eletrodomésticos, além de uma variedade imensa de produtos industriais.*

*Sob o binômio custo-benefício, as tintas constituem provavelmente o produto industrial mais efetivo no nosso mundo. Por exemplo, uma tinta com espessura de 75 micrometros representa somente 0,8% do valor total de um carro médio e ainda assim o protege da corrosão, provê cor e aspecto glamouroso. Uma tinta com espessura de um décimo de fio de cabelo humano protege a lata de alimentos da corrosão, mantém o sabor, embeleza a lata, tudo a custo não superior a 0,4% do custo total de venda ao consumidor da lata com seu conteúdo".*

As Tabelas 2.2 e 2.3 apresentam os volumes de tintas produzidos no Brasil e seus respectivos valores de faturamento anual desde 2000 até 2011, por segmento de mercado.

**Tabela 2.2:** Produção de tintas no Brasil/vendas (milhões de litros).

<b>VOLUME (milhões de litros)</b>					
<b>ANO</b>	<b>Imobiliária</b>	<b>Repintura</b>	<b>Ind. Automotiva</b>	<b>Ind. Geral</b>	<b>TOTAL</b>
2011	1.119	52	51	176	1.398
2010	1.083	51	50	174	1.359
2009	982	47	46	157	1.232
2008	975	49	48	171	1.243
2007	800	45	42	158	1.045
2006	741	40	40	147	968
2005	722	40	39	141	942
2004	701	37	37	138	913
2003	662	34	31	133	860
2002	663	33	30	131	857
2001	654	32	30	127	843
2000	653	30	28	119	830

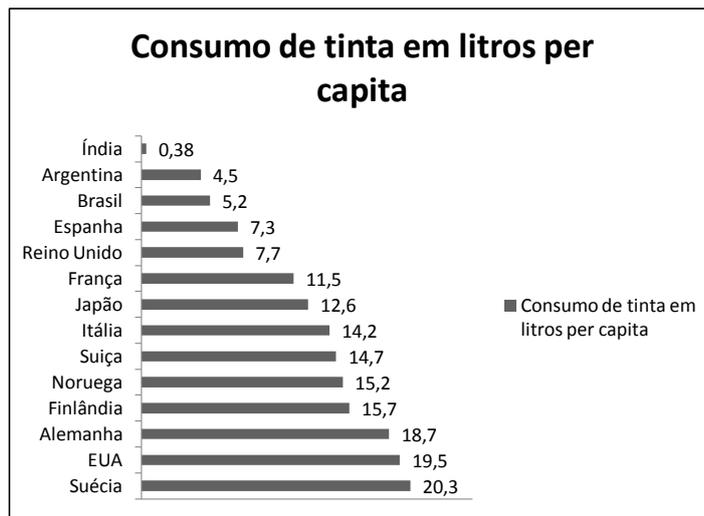
Fonte: Adaptado de <<http://www.abrafati.com.br>>. Acesso em 12 de maio de 2012.

**Tabela 2.3:** Faturamento anual devido à venda de tintas no Brasil (milhões de dólares americanos).

<b>FATURAMENTO (milhões de dólares)</b>					
<b>ANO</b>	<b>Imobiliária</b>	<b>Repintura</b>	<b>Ind. Automotiva</b>	<b>Ind. Geral</b>	<b>TOTAL</b>
2011	2.865	355	309	965	4.503
2010	2.470	310	270	850	3.900
2009	1.936	246	204	648	3.033
2008	1.983	262	221	727	3.193
2007	1.448	223	171	600	2.442
2006	1.206	191	152	501	2.050
2005	1.110	180	135	455	1.880
2004	888	139	107	366	1.500
2003	792	119	79	330	1.320
2002	672	101	67	280	1.120
2001	837	128	90	350	1.405
2000	910	140	90	380	1.520

Fonte: Adaptado de <<http://www.abrafati.com.br>>. Acesso em 12 de maio de 2012.

Embora os números das Tabelas 2.2 e 2.3 coloquem o Brasil entre os cinco maiores países ocidentais produtores de tintas, o consumo anual per capita de 5,2 litros em 2005 estava entre os mais baixos do mundo, conforme mostra a Figura 2.3.



**Figura 2.3:** Consumo de tintas no ano de 2005 (litros per capita) (Adaptado de Fazenda et al., 2009).

O Brasil representa um grande mercado potencial de tintas e correlatos, já que existem grandes possibilidades de crescimento no seu consumo per capita. Historicamente, esse crescimento tem sido superior ao crescimento PIB per capita (Fazenda et al., 2009).

As principais características da tinta que são desejáveis em um processo de impressão, conforme Craig (1987), são:

- Boa cobertura do substrato por densidade
- Transparência
- Secatividade
- Aderência

#### Composição Básica das Tintas

Tinta é uma dispersão líquida, geralmente viscosa, constituída de um ou mais pigmentos dispersos em um meio líquido que, ao sofrer um processo de cura quando estendida em uma película fina, forma um filme opaco e aderente ao substrato. Esse filme tem a finalidade de proteger e embelezar as superfícies.

Os componentes básicos da tinta, segundo Fazenda et al. (2009) são:

- Resina: é a parte não volátil da tinta, que serve para aglomerar as partículas de pigmentos. A resina também denomina o tipo de tinta ou revestimento empregado. Assim, por exemplo, existem as tintas acrílicas, alquídicas, epoxídicas, etc. Todas levam o nome da resina básica que as compõe. Antigamente, as resinas

eram à base de compostos naturais, vegetais ou animais. Hoje em dia são obtidas através da indústria química ou petroquímica por meio de reações complexas, originando polímeros que conferem às tintas propriedades de resistência e durabilidade muito superiores às antigas.

A formação do filme de tinta está relacionada com o mecanismo de reações químicas do sistema polimérico, embora outros componentes, como solventes, pigmentos e aditivos, tenham influência no sentido de retardar, acelerar e até inibir reações.

- **Pigmento:** é um material sólido finamente dividido, insolúvel no meio. Utilizado para conferir cor, opacidade, certas características de resistência e outros efeitos desejados. São divididos em pigmentos coloridos (conferem cor), não coloridos e anticorrosivos (conferem proteção aos metais).  
O índice de refração (I.R.) está diretamente relacionado ao poder de cobertura (propriedade da tinta de cobrir o substrato), sendo que os pigmentos coloridos devem possuir I.R. superior a 1,5 (I.R. médio das resinas utilizadas em tintas). As cargas possuem I.R. iguais ou ligeiramente superiores a 1,5, sendo, portanto, transparentes ou quase transparentes.
- **Aditivos:** são ingredientes que, adicionados às tintas, proporcionam características especiais às mesmas ou melhorias nas suas propriedades. São utilizados para auxiliar nas diversas fases de fabricação e conferir características necessárias à aplicação. Existe uma variedade enorme de aditivos usados na indústria de tintas e vernizes, a saber: secantes, anti-sedimentantes, niveladores, antipele, antiespumante, dispersantes, etc.
- **Solvente:** líquido volátil, geralmente de baixo ponto de ebulição, utilizado nas tintas e correlatos para dissolver a resina. São classificados em: solventes ativos ou verdadeiros, latentes e inativos.

### 2.3 Tinta: Um Fluido Não Newtoniano

Propriedades reológicas em tintas tendem a ser especialmente complexas em virtude da variedade dos materiais utilizados na sua composição. Isso torna o estudo reológico uma preciosa ferramenta na predição das propriedades do sistema, permitindo a formulação das tintas com maior precisão e aprimoramento das propriedades específicas desejáveis à sua manufatura e transferência.

O comportamento reológico de sistemas coloidais é geralmente muito complicado, refletindo não só características individuais das partículas, mas interações partícula-partícula e solvente-partícula. As moléculas ou partículas isoladas podem unir-se por ligações cruzadas covalentes (valência primária) ou associar-se por ação de forças de Van Der Waals.

Devido a essas complicações, a reologia tem sido, em grande parte, uma ciência puramente descritiva. Entretanto, nos últimos anos, registrou-se considerável progresso em relação ao entendimento mais profundo do comportamento reológico e ao desenvolvimento de uma base quantitativa para seu estudo.

Poucos líquidos apresentam comportamento newtoniano ou ideal. Alguns exemplos de líquidos perfeitos ou quase perfeitos incluem a água, solventes orgânicos, óleos minerais e poucas soluções de resinas (Fazenda et al., 2009).

Tintas são fluidos não-newtonianos, mas são ainda mais complicadas do que óleos de motor. Ao invés de polímeros dissolvidos causando resistência ao escoamento com cisalhamento, tintas têm partículas sólidas de pigmentos dispersos – o material que concede a própria cor à tinta. Cada tinta e cada cor apresentam diferenças na estrutura dessa dispersão de partículas de pigmentos. Mesmo tintas de mesma cor terão comportamentos diferentes, pois podem ter sido produzidas com pigmentos diferentes ou mesmo fornecedores diferentes de um mesmo pigmento. A maioria das tintas reduz sua viscosidade com cisalhamento e todas as tintas com o aumento de temperatura (Wiesemann, 2007), o que dá às tintas a característica de pseudoplasticidade (Fazenda et al., 2009).

Se em um sistema coloidal ocorrer agregação de partículas, então um aumento da taxa de cisalhamento tenderá a provocar um fracionamento dos agregados, diminuindo, assim, a viscosidade aparente do sistema. A diminuição da viscosidade com o cisalhamento é particularmente comum em sistemas contendo partículas assimétricas, pois essas partículas perturbam o fluxo de maneira mais acentuada do que partículas alinhadas.

## 2.4 Viscosidade

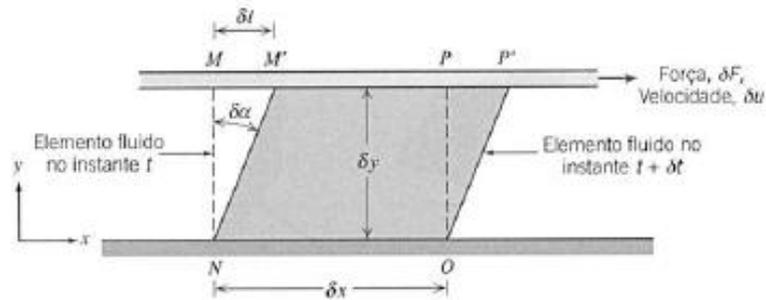
Devido à fluidez, ocorre a mudança de forma do fluido, sob a ação de uma tensão de cisalhamento. Em virtude da coesão molecular, surge a viscosidade, que é a resistência do fluido ao cisalhamento. Portanto, a viscosidade é contrária à fluidez; os líquidos mais viscosos, como as tintas de impressão, têm menor fluidez, e vice-versa. Tanto a viscosidade como a fluidez são características de cada fluido, que se manifestam no seu interior, independentes do material sólido com que estão em contato. A pressão não interfere na viscosidade, a não ser em condições excepcionais: por exemplo, certos óleos somente se transformam em sólidos plásticos se a pressão for superior a 2000 kgf/cm<sup>2</sup>. A viscosidade difere do atrito entre sólidos (ou entre um sólido e um fluido), embora haja algumas analogias entre a viscosidade e o atrito (Bastos, 1983).

Considerando o comportamento de um fluido entre duas placas infinitas onde a placa superior move-se a velocidade constante, sob a influência de uma força constante aplicada,  $\delta F_x$ , a tensão de cisalhamento aplicada ao fluido é dada (Fox, 2006) por

$$\tau_{yx} = \lim_{\delta A_y \rightarrow 0} \frac{\delta F_x}{\delta A_y} = \frac{dF_x}{dA_y} \quad (2.1)$$

onde  $\delta A_y$  é a área de contato do elemento fluido com a placa e  $\delta F_x$  é a força aplicada pela placa àquele elemento fluido. Durante o intervalo de tempo  $\delta t$ , o elemento fluido é deformado da posição MNOP para a posição M'NOP'.

Esse comportamento pode ser observado na Figura 2.4.



**Figura 2.4:** Deformação de um elemento fluido (Fox, 2006).

A taxa de deformação do fluido é dada pela Equação 2.2.

$$\text{taxa de deformação} = \lim_{\delta \alpha \rightarrow 0} \frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{d\alpha}{dt} \quad (2.2)$$

Para ângulos pequenos, se obtém a Equação 2.3

$$\frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{du}{dy} \quad (2.3)$$

onde:

$\delta \alpha / \delta t$  é a taxa de deformação ao longo do tempo e  $du / dy$  é a variação da velocidade na direção  $y$ .

Para um fluido newtoniano, o gradiente de velocidade é proporcional à tensão de cisalhamento (Fox, 2006). A constante de proporcionalidade se chama viscosidade e se define por:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.4)$$

onde:

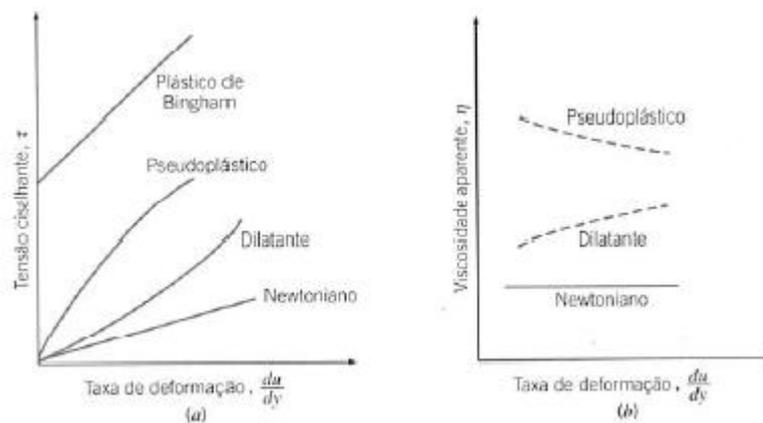
$\tau_{yx}$  é a tensão de cisalhamento e  $\mu$  é a viscosidade absoluta (ou dinâmica).

A unidade de viscosidade absoluta também recebe o nome de Poise que é definido como 1 g/cm.s. Esta unidade é grande para muitas aplicações práticas, de forma que as viscosidades se expressam mais geralmente em centipoises. A viscosidade de um fluido newtoniano depende essencialmente da temperatura e em menor parte da pressão. A viscosidade dos líquidos é sensível à temperatura e diminui conforme a temperatura aumenta. Por exemplo, a viscosidade da água a 0°C é mais de seis vezes seu valor correspondente a 100°C. A viscosidade dos líquidos aumenta ligeiramente com a pressão, a água é a única exceção, uma vez que sua viscosidade diminui e logo aumenta com o aumento da pressão. A maior parte das substâncias mais viscosas é chamada de fluidos não newtonianos e sua viscosidade depende também das forças cisalhantes (McCabe et al., 1972).

Para muitas soluções e dispersões, especialmente se forem concentradas e/ou contiverem partículas assimétricas, observam-se desvios do comportamento newtoniano. As principais causas do comportamento não newtoniano são: a formação de uma estrutura através do sistema e a orientação de partículas assimétricas (Fazenda et al., 2009).

Os fluidos que possuem uma relação linear entre tensão de cisalhamento e gradiente de velocidade são chamados de fluidos newtonianos. Já fluidos que não fluem até que se alcance um esforço cisalhante mínimo são chamados de plásticos de Bingham. Para esses fluidos, a relação das forças cisalhantes com o gradiente de velocidade é dependente do tempo de exposição desse fluido frente à força cisalhante (McCabe et al., 1972).

Os fluidos não newtonianos são geralmente classificados como tendo comportamento independente ou dependente do tempo, conforme Figura 2.5:



**Figura 2.5:** (a) Tensão de cisalhamento e (b) viscosidade aparente, como uma função da taxa de deformação para um escoamento unidimensional de vários fluidos não newtonianos (Fox, 2006).

Para fluidos com comportamento independente do tempo, a Equação 2.5 representa a relação entre  $\tau_{yx}$  e  $du/dy$

$$\tau_{yx} = k \left( \frac{du}{dy} \right)^n \quad (2.5)$$

onde  $n$  é o índice de comportamento do escoamento e o coeficiente,  $k$ , é o índice de consistência. Quando  $n=1$  e  $k=\eta$ , a equação pode ser escrita da conforme a Equação 2.6 – garantindo que  $\tau_{yx}$  tenha o mesmo sinal de  $du/dy$

$$\tau_{yx} = \eta \left( \frac{du}{dy} \right) \quad (2.6)$$

onde  $\eta$  é a viscosidade aparente que é dependente da taxa de cisalhamento, ao contrário de  $\mu$  que é constante (exceto para efeitos de temperatura). A maioria dos fluidos não newtonianos tem viscosidades aparentes relativamente elevadas quando comparadas com a viscosidade da água (Fox, 2006).

Um parâmetro importante que afeta a qualidade de impressão é a viscosidade da tinta. Para Joshi (2012), a viscosidade é uma medida da resistência do fluido de escoar, variando com a temperatura e a taxa de deformação (para fluidos não-newtonianos). Esta relação de dependência difere para cada formulação de tinta. É uma característica importante da tinta de rotogravura que deve ser monitorada e mantida constante na prensa. Ela influencia diretamente a qualidade de impressão, velocidade de secagem, aderência, brilho e outras características.

Os fatores que afetam a viscosidade na prensa incluem: características reológicas da tinta, velocidade de impressão, a taxa de evaporação, a forma da célula e gama, a lâmina de raspagem, os parâmetros de desenho de impressão, a natureza do substrato, etc. A qualidade é verificada através da reprodução de estruturas finas, intervalo de valores tonais, contraste da imagem, densidade de sólidos, ganho de ponto, etc.

#### 2.4.1 Viscosidade Dinâmica x Viscosidade Cinemática

A massa de um corpo é uma característica da quantidade de matéria contida nesse corpo, ou seja, trata-se de uma característica de inércia que o corpo opõe ao movimento.

Os efeitos da viscosidade serão tanto maiores quanto menor a inércia do fluido, ou seja, quanto menor a sua massa específica  $\rho$ . Com isso, é possível estabelecer a relação entre a viscosidade dinâmica  $\mu$  do fluido e sua massa específica  $\rho$ :

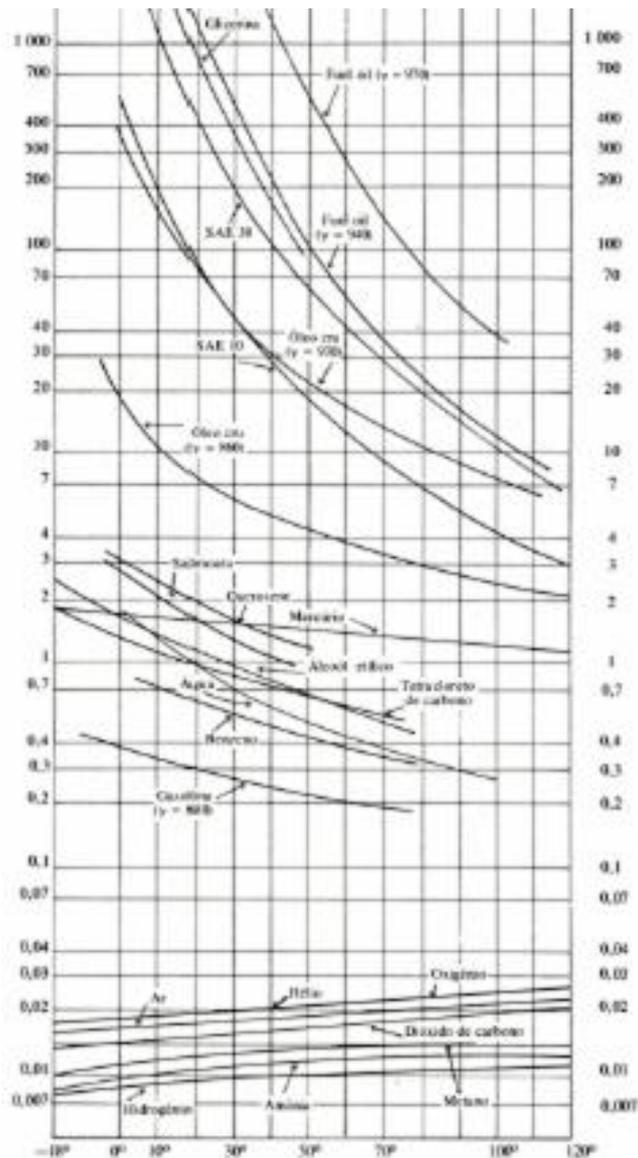
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.7)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente de viscosidade cinemática (Bastos, 1983).

#### 2.4.2 Influência da Temperatura na Viscosidade

##### Influência da Temperatura na Viscosidade Dinâmica

Nos líquidos, a viscosidade  $\mu$  diminui com o aumento de temperatura, suposta constante a pressão. Já para os gases, a viscosidade aumenta quando a temperatura cresce, admitindo-se constante a pressão. A Figura 2.6 mostra a dependência da viscosidade dinâmica com a temperatura para diferentes fluidos.



**Figura 2.6:** Variação da viscosidade dinâmica com a temperatura (em °C) (Fonte: Bastos, 1983).

### Influência da Temperatura na Viscosidade Cinemática

Nos líquidos, é desprezível a variação de massa específica em função da temperatura. Logo, considerando  $\rho$  constante na Equação 2.7, conclui-se que há proporcionalidade na variação de  $\mu$  e de  $\nu$  nos líquidos, nas diferentes temperaturas. Isto significa que as curvas representativas de  $\nu$  versus  $T$  tem a mesma declividade que as de  $\mu$  (Bastos, 1983).

### **2.5 Ganho de Ponto**

Por décadas, lidar com cores em produção gráfica era um trabalho semelhante ao de pintar cerâmica antes da queima. Nas artes-finais, as cores a serem aplicadas eram indicadas por valores numéricos de CMYK (ciano, magenta, amarelo e preto). Os fotolitos, com a separação de cores das fotos, vinham direto dos *scanners*. Tudo era reunido no filme limpo e a primeira visualização das cores reais do impresso só surgia na própria

máquina impressora. Assim como na cerâmica, os artistas gráficos precisavam imaginar como o produto ficaria quando as cores surgissem “vivas e brilhantes” sobre o papel.

A partir da década de 90, monitores coloridos de alta definição e as novas impressoras digitais de mesa facilitaram muito esse trabalho. Hoje, é possível criar um impresso em quatro cores e ver imediatamente o resultado final no monitor. Uma prova impressa pode ser obtida em poucos minutos. Surgem, no entanto, alguns novos desafios. Um deles é fazer com que os resultados no monitor e na prova correspondam ao que vai se obter na impressão final. Sem isso, o produtor corre o risco de ser enganado por seus olhos e aprovar um serviço que na realidade está insatisfatório. Os monitores e as impressoras de mesa são hoje os primeiros dispositivos de prova do fluxo de trabalho.

Uma das características mais importantes de qualquer processo de impressão em larga escala é o chamado ganho de ponto, um comportamento da tinta impressa que faz com que as cores e imagens tendam a ficar diferentes do previsto. Atualmente os densitômetros medem o ganho de ponto e uma gráfica que se preza sabe e informa esse dado aos seus clientes para que esses façam a compensação.

O efeito ganho de ponto é o resultado de uma soma de fatores físicos e ópticos que ocorrem quando colocamos tinta sobre papel para formar imagens impressas. Eles fazem com que as tonalidades e cores das tintas apresentem comportamentos diferentes do que seriam esperados, em especial nas retículas dos meio-tons. Normalmente, essas cores têm uma tendência ao escurecimento, que pode ser maior ou menor conforme o tipo de papel e processo de impressão. Mas também há casos de ganho de ponto negativo, onde as cores clareiam. Felizmente, boa parte desses efeitos pode ser previsto com antecedência, permitindo que se faça uma compensação nos arquivos digitais e fotolitos.

A primeira e mais importante causa do ganho de ponto é o aumento na área de cobertura dos pontos da retícula, que ocorre quando se aplica tinta sobre papel. É semelhante ao que ocorre quando se deixa cair um pingo de tinta nanquim ou de caneta num pedaço de papel: a tinta se espalha na medida em que vai sendo absorvida pelas fibras, e a mancha resultante é muito maior que o pingo original. O mesmo fenômeno, em escala reduzida, ocorre em todos os processos de impressão que usam originais reticulados. Em linhas gerais, o ganho de ponto é mais acentuado quanto mais absorvente for o papel e quanto maior for a quantidade de tinta (carga de tinteiro) aplicada pela impressora. Os maiores ganhos de ponto acontecem em papéis inferiores, do tipo jornal.

No entanto, o ganho de ponto não é uniforme em todas as tonalidades da retícula. Nos tons muito claros, a quantidade de tinta existente nos pequenos pontos é insuficiente para provocar um aumento significativo na área de cobertura. Nos tons muito escuros, o crescimento da área de cobertura é significativo, mas percentualmente reduzido em função do maior tamanho do ponto original. Além disso, boa parte da tinta espalha-se sobre áreas já cobertas pelos pontos adjacentes. Por isso, o fenômeno costuma ser mais acentuado nos meio-tons (25% a 75%), com pico na faixa entre 50% e 60%.

Uma das consequências desse tipo de comportamento é que o ganho de ponto não apenas escurece imagens coloridas, mas também pode mudar o tom das cores. Um

exemplo: numa cor laranja, feita com 90% de amarelo (90% da área recebe a cor amarela) e 60% de magenta (60% da área recebe a cor magenta), o ganho de ponto será muito mais acentuado na segunda cor que na primeira. Com isso, o tom laranja tenderá a distorcer, ficando mais vermelho quanto maior for o ganho de ponto da impressão.

O ganho de ponto também sofre influência do tipo de equipamento usado na impressão. Embora haja exceções, a regra geral diz que quanto mais uma impressora é otimizada para velocidade, menos ela é otimizada para qualidade. Por isso, máquinas de alta produtividade (em geral rotativas, que usam papel em bobinas) produzem ganhos de ponto mais altos que os encontrados nas máquinas mais lentas (normalmente planas, que usam folhas soltas). A tecnologia de impressão também faz diferença: algumas formas de impressão apresentam um ganho de ponto muito acentuado, enquanto que na rotogravura o fenômeno é reduzido.

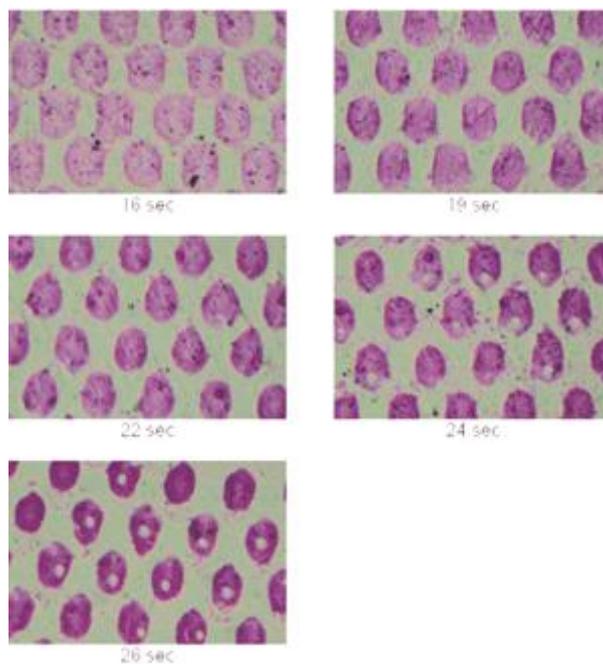
Outros fatores também tem influência sobre o crescimento da área dos pontos. Dentre eles destacam-se o tipo de fotolito (chapas produzidas com filmes positivos tem ganho de ponto menor que às feitas com filmes negativos, que são normalmente empregadas em jornais), o processo de gravação das chapas, a viscosidade da tinta, e a pressão dos rolos (SENAI, 2004).

### *2.5.1 Influência da Viscosidade no Ganho de Ponto*

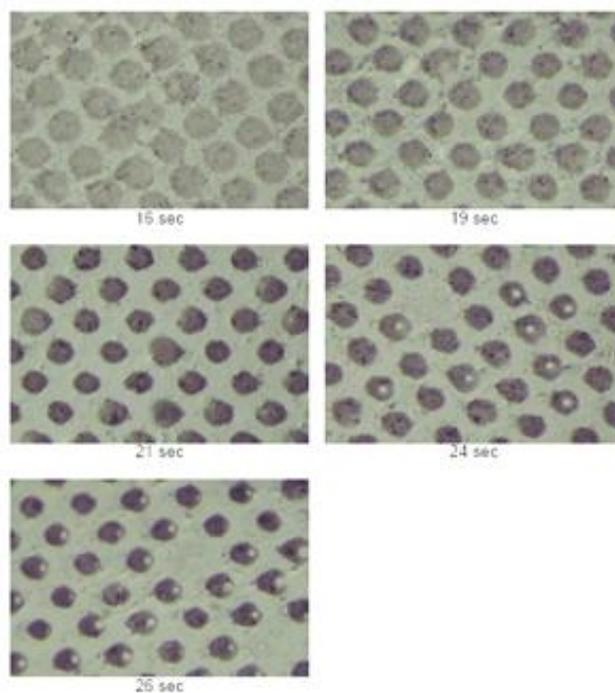
Uma pequena diferença na viscosidade pode produzir grandes variações em qualidade de impressão. A nitidez do ponto é muito influenciada pela viscosidade. Muitas vezes, tintas com viscosidade baixa, mostram um crescimento do ponto no impresso, fazendo com que a imagem perca a sua nitidez. A tinta escorre sobre o substrato antes que seque, e esse escorrimento irá resultar em uma impressão de espessura da tinta inconsistente. Se a tinta tiver uma viscosidade muito alta, pode também causar desvios de qualidade pela inconsistência de tinta no substrato. Viscosidade elevada, por vezes, faz com que haja secagem da tinta no interior das células (gravadas em baixo relevo onde a tinta é depositada) dos cilindros, resultando em entupimento dessas células. Isto reduz a eficiência das células para transportar a tinta e transferi-las para os substratos, como por exemplo, papéis ou cartões.

Por isso, uma forma de manter a qualidade da impressão de grande extensão é manter a viscosidade regulada. Esse fator ajuda a garantir que a tinta flua para fora das células gerando uma superfície de impressão lisa e pura (Joshi, 2012).

Uma representação da influência da viscosidade no ganho de ponto pode ser observada nas Figuras 2.7 e 2.8.



**Figura 2.7:** Representação da influência da viscosidade no ganho de ponto para o tom magenta (Joshi, 2012).



**Figura 2.8:** Representação da influência da viscosidade no ganho de ponto para o tom preto (Joshi, 2012).

### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Medições das Variáveis de Entrada e Variável Resposta do Processo

Para análise do ganho de ponto no impresso (produto acabado) foi utilizado um microscópio digital Coralís capaz de ampliar até 108 vezes a imagem.

Como a empresa estudada não dispõe de um espectrodensitômetro capaz de medir com exatidão a densidade, porcentagem e ganho de ponto, as análises realizadas nesse trabalho foram visuais e comparativas, através das fotos geradas pelo microscópio digital. A partir das imagens geradas, foi criada uma escala contínua através do consenso de uma equipe técnica, onde eram verificadas as variações de tamanho do ponto e, de acordo com as variações, as amostras eram ordenadas.



**Figura 3.1:** Foto do microscópio digital utilizado nas análises.

Com o intuito de analisar as variáveis de entrada ( $x$ ) do processo que provocam maior influência na variação do ganho de ponto ( $y$ ), foram coletadas 30 amostras do impresso ao longo do tempo.

Foram analisadas as seguintes variáveis do processo:

1. Temperatura ambiente
2. Pressão do rolo
3. Viscosidade da tinta
4. Temperatura da tinta
5. Tipo de lâmina de raspagem
6. Pressão da lâmina de raspagem

O equipamento utilizado para as análises de viscosidade durante as amostragens foi o copo Zahn 2, que consiste em um copo com um pequeno orifício no fundo e uma alça para segurar o copo enquanto a tinta flui. Para a realização das medições, esse viscosímetro é mergulhado no tinteiro verticalmente de maneira que a alça fique submersa. Deixa-se escoar a tinta, segurando a alça do viscosímetro com uma das mãos e retirando-o rapidamente do recipiente, mantendo-o na posição vertical e disparando o

cronômetro simultaneamente com a outra mão. O cronômetro é parado no momento em que a tinta para de escoar sob a forma de filete, registrando o tempo encontrado em segundos. A Figura 3.2 ilustra o equipamento utilizado.



**Figura 3.2:** Representação do instrumento de medição de viscosidade Copo Zahn 2.

Para conversão da medida de viscosidade cinemática de segundos para centiStokes foi utilizada a Tabela 3.1.

**Tabela 3.1:** Tabela de conversão do tempo de escoamento ( $t$  em segundos) para centiStokes utilizando Copo Zahn.

$CentiStokes = K.t - \frac{C}{t}$		
Tipo de Copo	K	C
Copo Zahn 1	1,59	1070
Copo Zahn 2	4,18	760
Copo Zahn 3	10,23	575
Copo Zahn 4	15,13	545
Copo Zahn 5	27,27	540

Fonte: (Adaptado de <<http://www.byk.com>>. Acesso em 19 maio 2012).

Para medição da temperatura da tinta, foi utilizado um termômetro tipo espeto, procurando sempre medir no mesmo local do tinteiro, a fim de eliminar quaisquer interferências.

Todas as amostras pertenciam ao mesmo produto e foram analisadas sempre na mesma região do impresso.

### 3.2 Análise dos dados

Nesse processo, existem variáveis discretas e variáveis contínuas que podem estar influenciando a variável de saída, contínua.

Conforme Spiegel (1985), variáveis contínuas são aquelas que podem assumir qualquer valor entre dois dados enquanto variáveis discretas possuem um número finito de valores.

A fim de realizar a análise da influência dos tipos de lâmina de raspagem (variável de entrada discreta) sobre o ganho de ponto (variável de saída contínua), se utilizou o teste de hipóteses *two sample-t*. Com isso, é possível tomar decisões acerca da população a partir da amostragem realizada. Através do teste de hipótese, é possível determinar se as duas amostras observadas diferem de modo significativo.

Com o intuito de conhecer a existência ou não de influências das outras variáveis contínuas do processo foi realizada uma análise de correlação linear múltipla. Nessa análise, o coeficiente de correlação linear *Pearson* foi determinado, considerando uma correlação fortemente positiva entre as variáveis quando este estivesse próximo de 1 e uma correlação fortemente negativa quando estivesse próximo de -1.

Santos (2007) propõe uma classificação da correlação linear, mostrada na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2:** Classificação do coeficiente de correlação linear de Pearson.

Coeficiente de correlação	Correlação
$r = 1$	Perfeita positiva
$0,8 \leq r < 1$	Forte positiva
$0,5 \leq r < 0,8$	Moderada positiva
$0,1 \leq r < 0,5$	Fraca positiva
$0 < r < 0,1$	Ínfima positiva
0	Nula
$-0,1 < r < 0$	Ínfima negativa
$-0,5 < r \leq -0,1$	Fraca negativa
$-0,8 < r \leq -0,5$	Moderada negativa
$-1 < r \leq -0,8$	Forte negativa
$r = -1$	Perfeita negativa

Fonte: Santos, 2007.

Para análise dos dados, foi utilizado o *software* estatístico Minitab 16®.

## 4 Resultados

### 4.1 Análise da Amostragem

Com o objetivo de se conhecer a influência das variáveis de entrada do processo no ganho de ponto - a variável resposta desse trabalho - foram realizadas algumas amostragens do processo, mostrado na Tabela 4.1, e seus dados analisados.

**Tabela 4.1:** Resultados da amostragem do processo de rotogravura.

Ordem	Temperatura Ambiente (°C)	Viscosidade Tinta (s)	Temperatura Tinta (°C)	Tipo Lâmina	Pressão Lâmina (bar)	Pressão Rolo (bar)	Ganho Ponto
1	28	16,30	27	Standard	2,0	4,0	34
2	29	15,67	31	Standard	2,0	4,0	8
3	29	15,62	31	Standard	2,0	4,0	22
4	29	15,53	31	Standard	2,0	4,0	21
5	29	15,61	32	Standard	2,0	4,0	25
6	29	15,64	31	Standard	2,0	4,0	24
7	29	15,45	30	Standard	2,0	4,0	23
8	27	17,82	25	Standard	2,6	3,5	11
9	27	17,47	25	Standard	2,6	3,5	7
10	27	17,60	25	Standard	2,6	3,5	5
11	26	18,26	25	Standard	2,6	3,5	4
12	28	17,79	26	Standard	2,6	3,5	2
13	29	17,45	26	Standard	2,6	3,5	3
14	28	17,51	26	Standard	2,6	3,5	1
15	31	15,61	32	Long Life	2,0	6,0	19
16	31	14,98	30	Long Life	2,0	6,0	17
17	31	14,85	30	Long Life	2,0	6,0	18
18	31	14,83	31	Long Life	2,0	6,0	27
19	30	15,16	30	Long Life	2,0	6,0	26
20	30	16,43	28	Long Life	2,1	5,0	15
21	31	16,28	30	Long Life	2,1	5,0	20
22	31	16,78	27	Long Life	2,1	5,0	13
23	31	16,29	30	Long Life	2,1	5,0	14
24	31	16,72	28	Standard	1,7	5,0	12
25	32	17,18	29	Standard	1,7	5,0	16
26	34	16,38	31	Standard	2,0	5,0	10
27	34	16,23	30	Standard	2,0	5,0	6
28	34	16,23	30	Standard	2,0	5,0	9

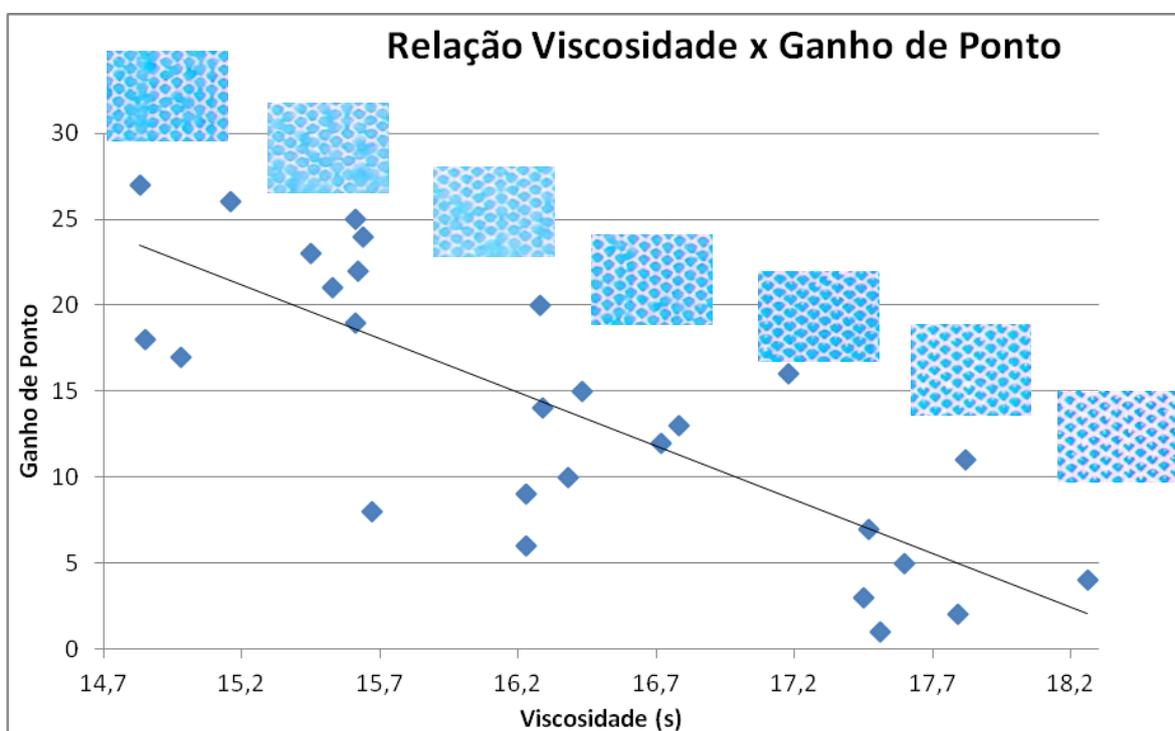
Os resultados da análise estatística (correlação linear) estão apresentados na Tabela 4.2, onde o coeficiente de correlação demonstra a força existente na relação entre variável de entrada e saída e o *P-Value* o nível de significância da relação (*P-Value* menor que 0,05 indica que a relação é estatisticamente significativa).

**Tabela 4.2:** Análise de correlação entre as variáveis de entrada e saída do processo.

Variáveis de Entrada	Coefficiente Pearson / P-Value
Temperatura Meio Ambiente	0,093
	0,640
Viscosidade da Tinta	-0,717
	0,000
Pressão da Lâmina de Raspagem	-0,623
	0,000
Pressão do Rolo	0,399
	0,036
Temperatura da Tinta	0,592
	0,001

Conforme observado na Tabela 4.2, os dados demonstram uma boa concordância encontrada entre os valores obtidos e o que fora observado na revisão bibliográfica. Pode-se observar que existe uma correlação de força moderada positiva entre a temperatura da tinta e o ganho de ponto e uma força moderada negativa entre a viscosidade da tinta e a pressão da lâmina de raspagem com o ganho de ponto. Todas essas influências são significativas estatisticamente, como comprovado pelos valores de *P-Value*.

Analisando a viscosidade da tinta com as imagens obtidas de ganho de ponto das amostras, se observa nitidamente, uma diferença no ganho de ponto, conforme demonstra a Figura 4.1.

**Figura 4.1:** Viscosidade da tinta em função do ganho de ponto e suas respectivas imagens.

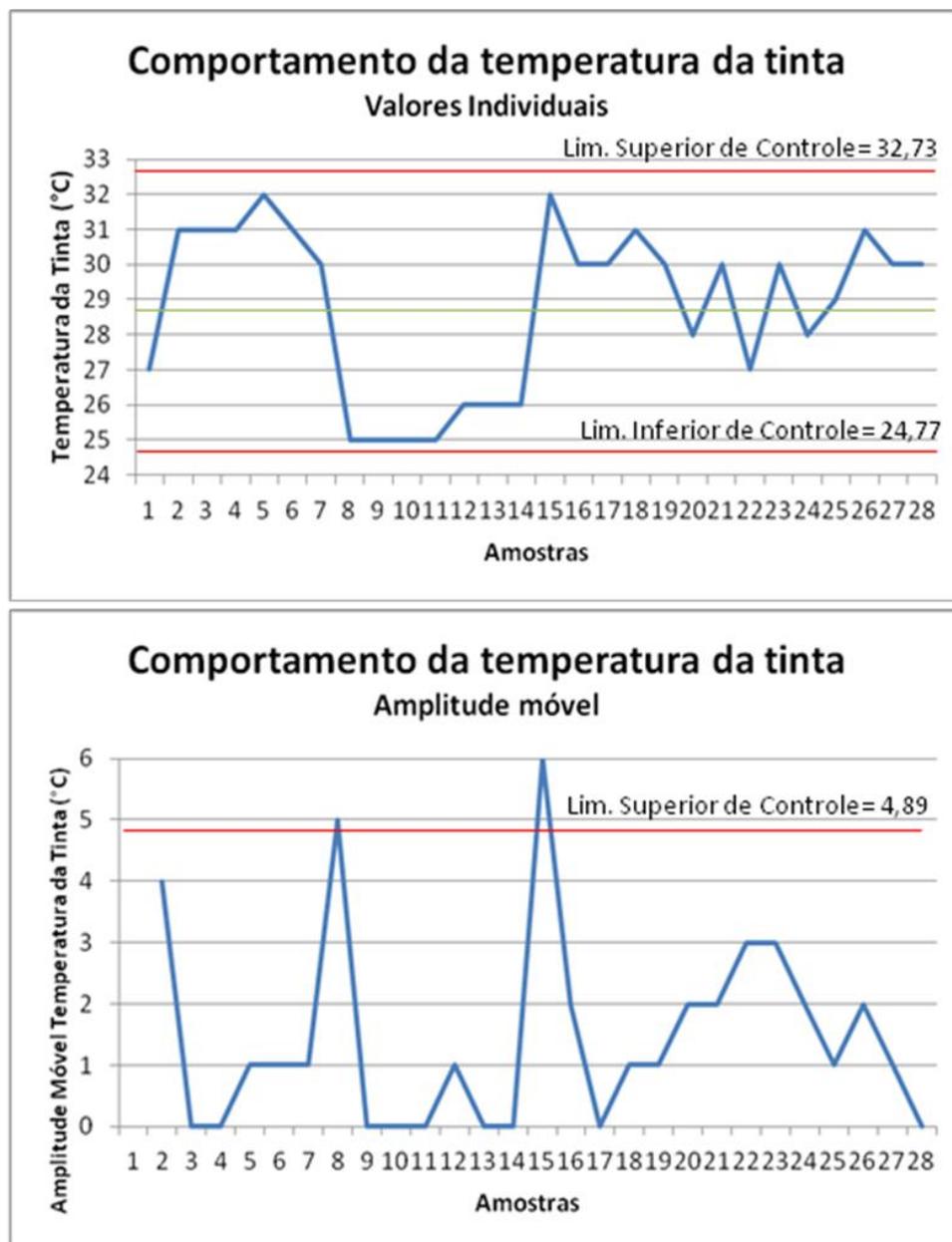
Uma vez identificada a relação entre as variáveis e analisando os dados da literatura, foi feito um estudo de correlação para entender, também, a influência da variação de temperatura na viscosidade da tinta, que como comprovado, tem uma influência no

ganho de ponto. Como pode ser observado na Tabela 4.3, a temperatura da tinta tem uma influência forte negativa com a viscosidade da mesma.

**Tabela 4.3:** Análise de correlação entre temperatura e viscosidade da tinta.

Variáveis de Entrada	Coefficiente Pearson / P-Value
Temperatura da Tinta	-0,847
	0,000

As amostras analisadas nesse estudo foram coletadas ao longo de um mês, por isso, é importante observar como a temperatura da tinta se comporta ao longo do tempo. Segundo as cartas de controle mostradas na Figura 4.2, podemos observar que o processo é instável, uma vez que observamos medições fora dos limites de controle. Além disso, se observa uma alta variabilidade dos dados ao longo do tempo, o que, como visto anteriormente, interfere na variação do ganho de ponto.



**Figura 4.2:** Carta de controle de valores individuais e amplitude móvel da temperatura da tinta.

Segundo Gravure Education Foundation (2003), manter a temperatura da tinta entre 21°C e 26°C permite um controle adequado da viscosidade obtendo-se bons resultados impressos. Porém, pode-se observar nas cartas de controle da Figura 4.2 que a média de temperatura do processo estudado foi de 28,75°C, podendo atingir valores acima de 32°C.

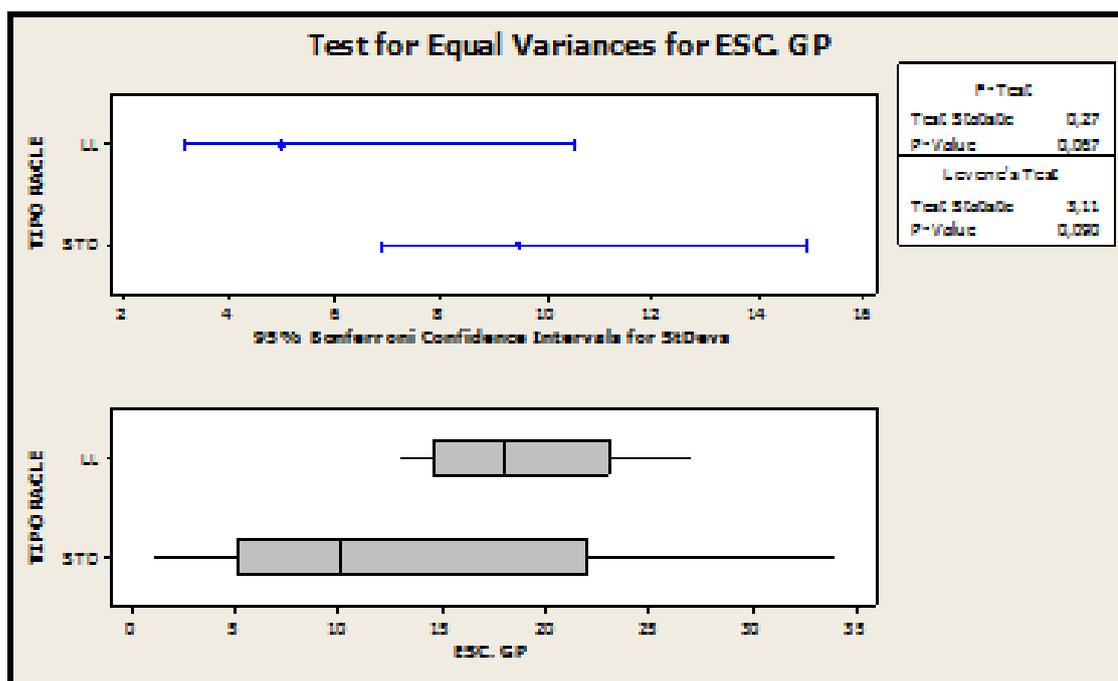
Após a análise das variáveis de entrada contínuas, foi realizada a análise da única variável discreta do processo, as lâminas de raspagem. Para essa análise, se procurou evidenciar a diferença entre as médias do processo operando com a lâmina de raspagem *Standard* e *Long Life*, através do teste de hipótese para duas médias do Minitab.

O resultado gerado pelo software consta na Figura 4.3.

Teste de Hipóteses para Duas Médias			
Tipos de Lâmina vs Ganho de Ponto			
Tipo Lâmina	Número Amostras	Média	Desvio Padrão
Importada (Long Life)	9	18,78	4,94
Nacional (Standard)	19	12,79	9,46
Diferença = média (LL) - média (Std)			
Estimativa da diferença: 5,99			
Intervalo de Confiança de 95% para as diferenças: (0,38; 11,60)			
P-Value: 0,037			

**Figura 4.3:** Resultados do teste de hipótese entre médias de ganho de ponto para diferentes lâminas de raspagem.

Conforme os resultados mostrados na Figura 4.3, é possível identificar, através do *P-Value*, uma diferença estatisticamente significativa entre as lâminas de raspagem. Em média, a lâmina de raspagem *Long Life* produz imagens com maior ganho de ponto, porém é uma diferença bastante pequena. Ao se analisar as variâncias de ambas as amostras, tem-se os resultados conforme Figura 4.4.



**Figura 4.4:** Resultados do teste de hipóteses entre variâncias de ganho de ponto para diferentes lâminas de raspagem.

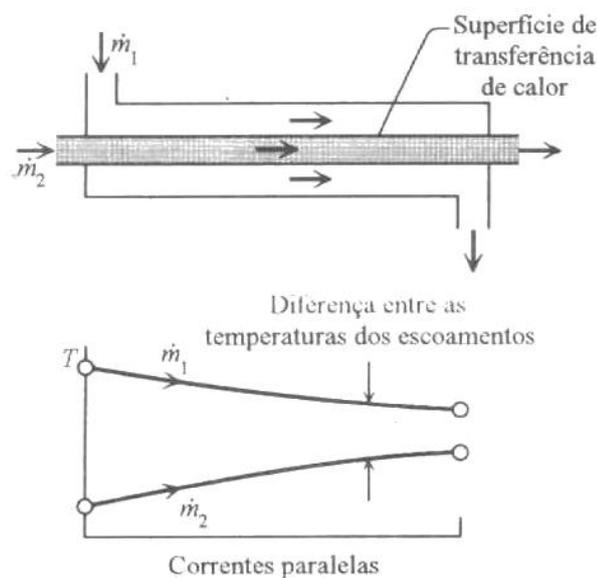
Nesse caso, é possível observar que não existe diferença significativa entre as variâncias nos ganhos de ponto entre os dois tipos de lâminas de raspagem.

#### 4.2 Solução Proposta

Uma vez observado, a partir dos resultados encontrados nesse trabalho, que a temperatura da tinta utilizada no processo está muito acima do *range* teórico, a empresa em questão decidiu por iniciar o projeto de adequação desse parâmetro pela redução da média da temperatura da tinta.

Conforme os dados obtidos ao longo da amostragem, foi visto que a média da temperatura está em torno de 28°C, sendo necessário reduzi-la em aproximadamente 4°C para atingir a faixa de temperatura recomendada em Gravure Education Foundation (2003).

Para solucionar esse problema, esse trabalho propõe projetar um trocador de calor bitubular, uma vez que a troca térmica entre os fluidos não é elevada e esse tipo de trocador apresenta maior facilidade de instalação e limpeza. No processo estudado se utilizará correntes paralelas (co-correntes), ou seja, os fluidos quente e frio entram pela mesma extremidade, correm na mesma direção e saem pela outra extremidade, conforme Figura 4.5.



**Figura 4.5:** Trocador de calor bitubular e escoamento paralelo.

Nos tópicos seguintes, o procedimento para projeto do trocador de calor é descrito e os cálculos são realizados através de uma planilha criada pela autora que permite à empresa utilizar os mesmos cálculos para outras tintas alternativas que possam vir a necessitar de um controle de temperatura.

Como observado na Figura 4.2, a tinta necessita ser resfriada (fluido quente) e, para isso, se utilizará como fluido frio a água. Para esse resfriamento, optou-se por

projetar um trocador em que a tinta escoasse pelo tubo interno e a água pelo tubo externo. Com isso, pode-se garantir menores problemas com vazamentos e um melhor controle da vazão da tinta, já que se tem um tubo com diâmetro pequeno.

Como já observado na revisão bibliográfica, a tinta utilizada em rotogravura se comporta como um fluido não newtoniano. Porém, essa não possui o comportamento de um fluido pastoso, por exemplo, que necessita de tensão mínima para escoar. Dessa forma, neste estudo, aproxima-se o comportamento da tinta ao comportamento de um fluido newtoniano.

#### 4.2.1 Procedimento de Cálculo

A taxa de calor requerida é obtida através da equação de balanço de energia global no fluido quente (Incropera et al.,2008).

$$q = W_q \cdot C_{p,q} \cdot (T_{q,ent} - T_{q,sai}) \quad (4.1)$$

Onde  $q$  é a taxa total de transferência de calor entre o fluido quente e o fluido frio,  $W_q$  é a vazão mássica,  $c_{p,q}$  é a capacidade calorífica,  $T_{q,ent}$  é a temperatura de entrada,  $T_{q,sai}$  é a temperatura de saída e o índice  $q$  é referente ao fluido quente.

Rearranjando a Equação 4.1, é possível calcular a temperatura de saída do fluido frio, a água, da seguinte forma:

$$T_{f,sai} = \frac{q}{W_f} - T_{f,ent} \quad (4.2)$$

De posse desses dados, a área de troca térmica,  $A$ , do trocador de calor pode ser obtido através da equação

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (4.3)$$

onde

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad (4.4)$$

e

$$A = \pi \cdot D_i \cdot L \quad (4.5)$$

O coeficiente global de transferência de calor,  $U$ , é

$$U = \frac{1}{(1/h_i) + (1/h_e)} \quad (4.6)$$

onde  $h_i$  e  $h_e$  são os coeficientes de película do tubo interno e externo, respectivamente.

Para o escoamento da tinta através do tubo interno,

$$\text{Re} = \frac{4.W_q}{\pi.d_i.\mu_q} \quad (4.7)$$

Onde Re (número adimensional) é a razão entre as forças de inércia e viscosas,  $d_i$  é o diâmetro interno do tubo,  $W_q$  é a vazão mássica e  $\mu_q$  é a viscosidade do fluido quente (Incropera et al.,2008).

Uma vez que temos nesse processo um escoamento turbulento de tinta, que será demonstrado, ou seja, o número de Reynolds é maior que 2300, pode-se dizer que o escoamento é turbulento e, por isso, calcula-se o número de Nusselt, segundo Kern (1950) conforme a equação

$$\text{Nu} = 0,027.\text{Re}^{0,8}.\text{Pr}^{1/3} \quad (4.8)$$

onde o número de Nusselt ( $Nu$ ) representa a razão entre transferência de calor por convecção e somente por condução e Pr é o número de Prandtl (adimensional), que representa a razão entre as difusividades de quantidade de movimento e térmica, dado pela seguinte equação

$$\text{Pr} = \frac{\mu_q.C_{p,q}}{k_q} \quad (4.9)$$

onde  $k_q$  é a condutividade térmica do fluido quente.

Com isso, sabe-se que

$$h_i = \text{Nu}.\frac{k_q}{d_i} \quad (4.10)$$

Para o escoamento da água através do tubo externo, o diâmetro equivalente é dado por

$$D_e = \left( \frac{D_i^2 - d_o^2}{d_o} \right) \quad (4.11)$$

onde  $D_i$  é o diâmetro interno do tubo externo e  $d_o$  é o diâmetro externo do tubo interno.

O número de Reynolds é calculado por

$$\text{Re} = \frac{4.W_f}{\pi.D_e.\mu} \quad (4.12)$$

No Capítulo 4.2.3, pode-se observar que o escoamento anular é, também, turbulento, uma vez que Reynolds é maior que 2300. Com isso, calcula-se o número de Nusselt conforme Equação 4.8, utilizando número de Reynolds e Prandtl calculados para a água.

Com isso, é possível, conforme Kern (1950), determinar  $h_e$  através da Equação 4.13.

$$h_e = Nu \cdot \frac{k_f}{D_e} \quad (4.13)$$

Através da Equação 4.6, determina-se  $U$  e, por fim, a área de troca térmica e o comprimento  $L$  do tubo através das Equações 4.3 e 4.5.

#### 4.2.2 Determinação da Capacidade Térmica, Densidade e Condutividade Térmica da Tinta

Para início dos cálculos do trocador de calor, algumas propriedades precisaram ser determinadas experimentalmente. As propriedades termofísicas da água são conhecidas, porém a massa específica e calor específico da tinta precisaram ser determinados, uma vez que esses valores eram desconhecidos.

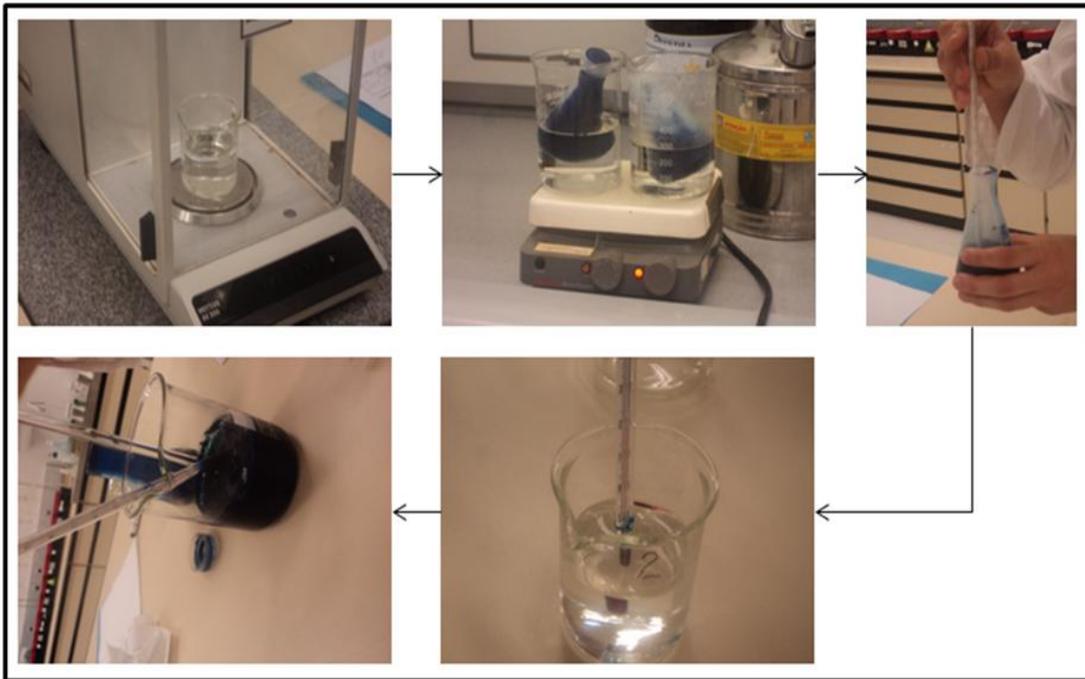
Para a determinação da massa específica, foi feita a pesagem de um volume conhecido de tinta com uma proveta de 50 ml em uma balança analítica Mettler AE200. A massa específica,  $\rho$ , é dada pela Equação 4.14 e Figura 4.6.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.14)$$



**Figura 4.6:** Procedimento para determinação da massa específica da tinta.

Outra propriedade que foi necessária determinar foi o calor específico da tinta, que é a variação térmica que uma substância sofre ao receber uma quantidade de calor (Incropera et al.,2008). Para isso, foi realizada uma análise com água e tinta de massas conhecidas, onde a tinta foi aquecida em banho-maria em uma chapa de aquecimento, as temperaturas de ambos fluidos foram medidas, e se fez a mistura dos dois fluidos. Após 2 minutos, a temperatura da solução foi medida. Esse procedimento foi realizado em duplicata, conforme ilustrado na Figura 4.7.



**Figura 4.7:** Procedimento para determinação do calor específico da tinta.

De posse dos dados, foi aplicado um balanço de energia para esse sistema, onde o calor perdido pela tinta é igual ao calor recebido pela água

$$q_{tinta} = q_{\text{água}} \quad (4.15)$$

onde, através da Equação 4.1, tem-se

$$W_{tinta} \cdot c_{p,tinta} \cdot (T_{q,ent} - T_{q,sai}) = W_{\text{água}} \cdot c_{p,\text{água}} \cdot (T_{f,ent} - T_{f,sai}) \quad (4.16)$$

Nessa equação, os índices q e f se referem aos fluidos quente e frio, enquanto *ent* e *sai* designam as condições do fluido na entrada e saída.

Para a determinação da condutividade térmica, foi utilizado o valor para acetato de etila, que é o solvente utilizado na tinta analisada. Segundo Perry (1950), a condutividade térmica do acetato de etila em temperaturas próximas de 20°C é 0,101 Btu/(h)(ft<sup>2</sup>)(°F/ft), ou seja, 0,17 W/m.K.

#### 4.2.3 Determinação da Área de Troca Térmica

Na Figura 4.8, é mostrada uma representação da planilha de cálculo criada pelo autor desse trabalho, onde é possível verificar toda a sequência de cálculos, conforme procedimentos descritos anteriormente. Pode-se observar que, para os diâmetros de tubos especificados, será necessária uma área de troca térmica de 0,247m<sup>2</sup>, ou seja, o trocador terá comprimento de 6,54m.

## DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE TROCA TÉRMICA PARA UM TROCADOR BITUBULAR CORRENTES PARALELAS



Dados dos Fluidos		
Propriedades/Flui	Fluido frio	Fluido quente
	Água	Tinta
T <sub>entrada</sub> (K)	279,800	301,0000
T <sub>saída</sub> (K)	280,925	297,0000
C <sub>p</sub> (J/kg.K)	4178,000	3091,0000
μ (N.s/m <sup>2</sup> )	0,001	0,0160
k(W/m.K)	0,625	0,1700
Pr	9,506	290,9176
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	1000,000	944,0000
W (kg/s)	1,000	0,3800
Dados dos Tubos		
Do/Di	do/di.	De/De*
Água	Tinta	Água
0,0420	0,0120	0,1213
0,0400	0,0100	0,028
Ao (m <sup>2</sup> )	Ai (m <sup>2</sup> )	
0,0011	0,0001	
Go (kg/m <sup>2</sup> .s)	Gi (kg/m <sup>2</sup> .s)	
874,9213	4840,7643	
Parâmetros	Resultados	Unidades
q	4698,320	W
T <sub>f, sai</sub>	280,925	K
?T1	21,200	K
?T2	16,075	K
?Tml	18,520	K
Re <sub>r,t</sub>	3025,478	
Escoamento	Turbulento	
Nu <sub>r,t</sub>	108,957	
hi <sub>r,t</sub>	1852,271	W/(m <sup>2</sup> .K)
Re <sub>a</sub>	74653,384	
Escoamento	Turbulento	
Nu <sub>a</sub>	449,303	
he <sub>a</sub>	2314,405	W/(m <sup>2</sup> .K)
U	1028,855	W/(m <sup>2</sup> .K)
A	0,247	m <sup>2</sup>
L	6,544	m

Figura 4.8: Planilha de cálculo do Microsoft Excel® para trocador de calor bitubular.

#### 4.2.4 Determinação da Queda de Pressão

Após a determinação do projeto térmico do trocador de calor, é preciso verificar se o equipamento atenderá às condições reais de projeto hidráulico. Em um processo que a

pressão total fornecida pela bomba seja menor àquela projetada para o equipamento, possivelmente, o resultado final da troca térmica será ineficiente.

Para evitar problemas como esse, o cálculo de perda de pressão nas duas correntes (fria e quente) foi incluído no cálculo do projeto do trocador de calor em questão.

A queda de pressão no tubo interno foi calculada conforme as Equações 4.17 e 4.18

$$f = 0,035 + \frac{0,264}{\text{Re}^{0,42}} \quad (4.17)$$

$$\Delta P = \frac{4 \cdot f \cdot G^2 \cdot L}{2 \cdot g \cdot \rho \cdot d_i} \quad (4.18)$$

onde:

$f$  = fator de atrito

$G$  = fluxo mássico do tubo

$d_i$  = diâmetro interno do tubo

$g$  = aceleração da gravidade

$L$  = comprimento do trocador

$\rho$  = densidade do fluido

$\Delta P$  = queda de pressão

Para o tubo externo foi calculado o número de Reynolds utilizando o diâmetro equivalente, citado na Equação 4.11, conforme Equação 4.19

$$\text{Re}^* = \frac{D_e^* \cdot G_o}{\mu} \quad (4.19)$$

onde

$$D_e^* = D_i - d_o \quad (4.20)$$

e  $G_o$  é o fluxo mássico da água.

Com isso, calcula-se o fator de atrito conforme Equação 4.21

$$f = 0,0035 + \frac{0,264}{\text{Re}^{*0,42}} \quad (4.21)$$

Por fim, calcula-se a queda de pressão no tubo externo através da Equação 4.22

$$\Delta P = \frac{G_o^2}{2 \cdot \rho \cdot g} \left( 4 \cdot f \cdot \frac{L}{D_e^*} + n \right) \quad (4.22)$$

Os valores obtidos podem ser observados na Figura 4.9, uma planilha criada pelo autor.

## DETERMINAÇÃO DA QUEDA DE PRESSÃO PARA UM TROCADOR BITUBULAR CORRENTES PARALELAS



Propriedades/Fluido	Fluido frio	Fluido quente	Unidades
	Água	Tinta	S.I.
Re* / Re	17227,704	3025,478	adim.
f	0,039	0,044	adim.
G	874,921	4840,764	kg/m <sup>2</sup> s
L	6,544	6,544	m
g	9,800	9,800	m/s <sup>2</sup>
ρ	1000,000	944,000	kg/m <sup>3</sup>
De* / di	0,028	0,010	m
ΔP	1438,151	146241,805	N/m <sup>2</sup>

**Figura 4.9:** Queda de pressão para tinta e água no trocador bitubular (Planilha do Microsoft Excel®).

### 4.2.5 Considerações Finais

Conforme as análises estatísticas realizadas, foi possível verificar a influência significativa da pressão da lâmina de raspagem no ganho de ponto bem como uma diferença de média devido ao uso de dois tipos de lâminas de raspagens diferentes. A empresa estudada relatou que os ajustes de pressão da lâmina de raspagem e a decisão quanto ao tipo de lâmina de raspagem a ser utilizada depende de outras variáveis do processo, que atualmente impactam na qualidade da impressão, como cilindros com rugosidade ou dureza fora de especificação.

Quanto aos cálculos do trocador de calor proposto, não foi necessário calcular a incrustação dos fluidos nos tubos, uma vez que os trocadores precisarão ser trocados com frequência (máximo a cada 3 dias) e serem limpos, uma vez que diferentes tintas são utilizadas nas mesmas unidades de impressão para produtos diferentes. Na empresa, há um setor voltado somente à lavagem de acessórios utilizados na operação. Por essa razão, dentre outras já citadas, este trabalho propôs colocar a tinta escoando no tubo interno do equipamento, o que facilita a sua limpeza.

## **5 Conclusões e Trabalhos Futuros**

A partir dos resultados deste trabalho, foi possível validar as influências da viscosidade e da temperatura da tinta no efeito ganho de ponto do processo analisado, conforme observado na revisão bibliográfica. Conforme a temperatura aumenta, tem-se uma redução da viscosidade que implica em um maior escorrimento da tinta sobre o substrato.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, não foi possível executar a implementação da solução proposta, um trocador de calor que garanta que o processo opere com tintas com média de 24°C, devido ao curto espaço de tempo.

Por essa razão, este trabalho será entregue aos responsáveis pelo processo de rotogravura para posteriores análises e implementações.

A partir da solução proposta, já será possível operar com tintas em temperaturas ideais de operação, o que facilitará os ajustes do processo e a redução da variabilidade da qualidade dos impressos.

Após a instalação do trocador, é importante analisar como a temperatura da tinta irá se comportar, através de cartas de controle, e, caso seja necessário reduzir ainda mais a variabilidade da temperatura, é aconselhável projetar-se um controlador de temperatura de tinta, que atue na vazão de água fria no trocador, assegurando, portanto, um ganho de ponto mais constante.

Devido ao longo comprimento calculado para o trocador, é possível criar um trocador de formato serpentina que operará com uma perda de carga ainda menor que a do trocador bitubular. Uma grande vantagem de se utilizar um trocador serpentina é, inclusive, seu baixo custo, o que tornaria viável a implementação em processos que apresentam diversas unidades de impressão.

## 6 Referências

- ABRAFATI. Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas. Disponível em: <<http://www.abrafati.com.br>>. Acesso em 12 de maio de 2012.
- BARBOSA, Daniele O. et al. Guia Técnico Ambiental da Indústria Gráfica. 2ªed. São Paulo: Cetesb: Sindigraf, 2009.
- BASTOS, Francisco de Assis A. Problemas de Mecânica dos Fluidos. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 1983.
- BOBST. Bobst Group S.A. Disponível em: <<http://www.bobst.com>>. Acesso em 15 de maio de 2012.
- BYK Additives & Instruments. Disponível em: <<http://www.byk.com>>. Acesso em 19 de maio de 2012.
- CRAIG, James. Produção Gráfica. São Paulo: Nobel 1987.
- FAZENDA, Jorge M. R. et al. Tintas & Vernizes: Ciências e Tecnologia. 4ª ed. São Paulo: Blusher, 2009.
- FOX, Robert W. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- GRAVURE EDUCATION FOUNDATION AND GRAVURE ASSOCIATION OF AMERICA. Gravure – Process and Technology. 2ª ed. Rochester, 2003.
- INCROPERA, Frank P. et al. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- JOSHI, Akshay V. Effects of Ink Viscosity. Disponível em: <<http://www.gravurexchange.com/pdfs/GravurEzine-0703.pdf>>. Acesso em 10 de maio de 2012.
- KERN, Donald Q. Process Heat Transfer. New York: McGraw-Hill, 1950.
- McCABE, Warren L. et al. Operaciones Básicas de Ingeniería Química.v1. Buenos Aires: Reverté,1972.
- PERRY, J.H. Chemical Engineers Handbook. 3ª ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1950.
- SANTOS, Carla. Estatística Descritiva - Manual de Auto-Aprendizagem. Lisboa: Edições Sílabo, 2007.
- SENAI. Apostila de Produção Gráfica SENAI Unidade Dendezeiros (BA). Salvador, 2004.
- SPIEGEL, Murray Ralph. Estatística. 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil,1985.
- WIESEMANN, Rudy. GravurEzine. The Definitive Technical Journal for the Global Gravure Community, 2007.

WISMAR, Marco. Tintas e Resinas. Chemical and Engineering News, 1984.