



EFEITO DA CAPACIDADE DE TROCA TÉRMICA DE UM CHILLER POR CONDENSAÇÃO A AR NO RESFRIAMENTO NA MOAGEM DE PIGMENTOS

Ana Paula Alves da Silva¹

Carolina Resmini Melo Marques²

Larissa Bento Bortolatto³

Clauber Roberto Melo Marques⁴

Aline Resmini Melos⁵

Resumo: Em uma Empresa do Sul de Santa Catarina, onde são produzidas tintas para impressão flexográfica, é necessária uma moagem eficiente e que permita tamanho de partícula menor que 10 μm , para isto são utilizados moinhos de bolas. Na Empresa em estudo existem três moinhos de bolas em operação e um chiller para resfriamento. Devido ao aumento de produção, a seguinte pesquisa teve como objetivo a verificação da possibilidade de implantação de mais moinhos considerando o chiller atual. Para que possam ser realizados os cálculos termodinâmicos necessários foram coletados dados do próprio chiller como pressão, temperatura da água na entrada e na saída, bem como a temperatura ambiente no momento da coleta. Com os cálculos executados encontraram-se quatro moinhos como o máximo que o equipamento suporta, isto porque o trabalho realizado pelo compressor ultrapassou seu valor nominal quando em cinco moinhos.

Palavras-chave: Fluido Refrigerante. Moinho de Bolas. Troca Térmica. Pigmento.

1 INTRODUÇÃO

As tintas são feitas a partir de uma importante matéria-prima para o produto, o pigmento. O pigmento é misturado com resina, água e aditivo e após a mistura, é colocado no moinho de bolas, o produto deste processo se chama “pasta”. Este por sua vez mói o pigmento até uma granulometria de, no máximo, 10 μm através da rotação do cilindro onde se encontram as esferas e a pasta. O produto que está sendo moído é encamisado com outro cilindro onde passa água para o resfriamento. A água usada para o resfriamento é devolvida ao chiller para que ela alcance a temperatura própria para retornar ao moinho novamente.

¹ Graduanda em Engenharia Química. E-mail: alves.anapaula@hotmail.com

² Professora Faculdade Satc. E-mail: carolina.melo@satc.edu.br

³ Professora Faculdade Satc. E-mail: larissa.bortolatto@satc.edu.br

⁴ Professor Faculdade Satc. E-mail: clauber.marques@satc.edu.br

⁵ Coordenadora Faculdade Satc. E-mail: aline.melo@satc.edu.br



A pesquisa trata da troca térmica no chiller utilizado na Empresa e seu comportamento com o aumento da demanda de produção de tintas flexográficas em uma indústria do Sul Catarinense.

O presente trabalho tem por objetivo estudar e calcular a capacidade de troca térmica do trocador de calor atual levando em consideração a implantação de um novo moinho. A Empresa já possui três moinhos em sua linha de produção e o objetivo é adicionar mais moinhos de mesma capacidade com o intuito de elevar a produtividade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será descrita a tecnologia na indústria de tintas flexográficas e seu processo de moagem. Será abordado como é o funcionamento do moinho de bolas bem como fatores que influenciam diretamente na efetividade da moagem. Também serão detalhadas as etapas do chiller e suas condições de trabalho.

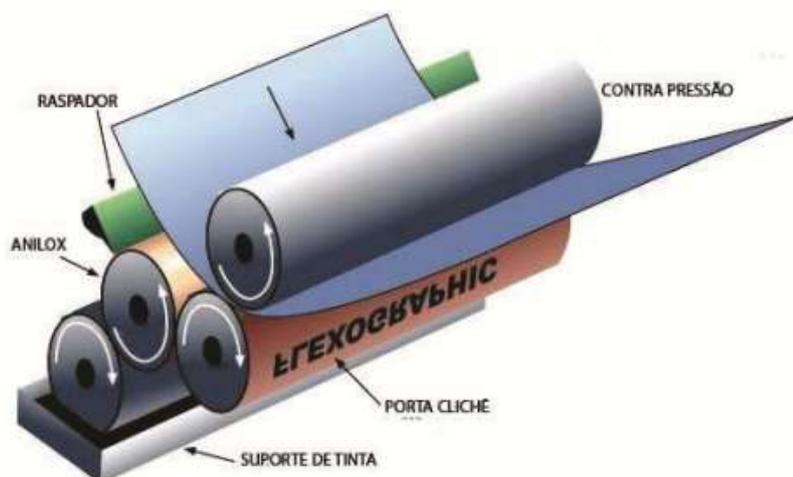
2.1 INDÚSTRIA DE TINTAS FLEXOGRÁFICAS

A flexografia é um processo de impressão gráfica que acontece com a deposição da tinta em uma “fôrma” relevográfica chamada clichê, como afirma Santos [1]. Esta possui como característica a impressão direta no substrato, mas para que seja possível, necessita além do clichê, de um cilindro de anilox, um suporte para a tinta e um raspador, como é ilustrado na Fig. 1 [2].

Segundo Santos [1], o cilindro em contato com a tinta é o responsável por transferi-la para o cilindro de anilox, que com a ajuda do raspador, garante que a quantidade de tinta necessária para tal impressão seja transportada para o cilindro de porta clichê. Este por sua vez promove a impressão do layout confeccionado no clichê no substrato desejado.

Para impressões flexográficas o tamanho da partícula se torna um fator determinante em uma impressão de qualidade. Isto porque partículas maiores de pigmentos podem danificar o anilox, bem como a impressão.

Figura 1: Esquema de impressão flexográfica.



Fonte: [2]

2.1.1 Moinho de bolas

A moagem tem por objetivo promover a cominuição, ou fragmentação, das partículas desejadas. Inclusive, diferente dos britadores, os moinhos são capazes de obter frações mais finas, define Chaves e Peres [3].

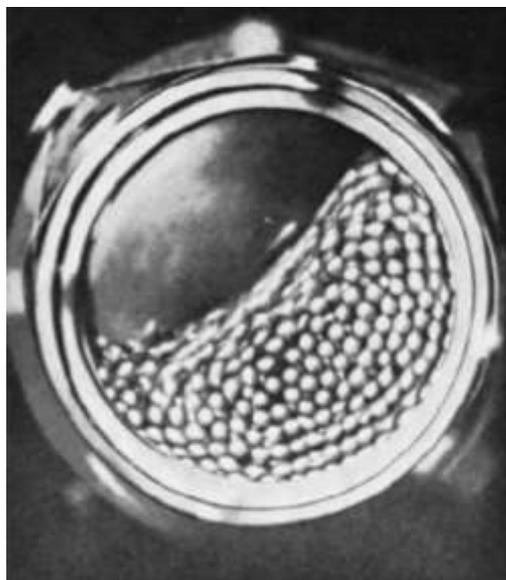
Segundo Oliveira [4] a cominuição tem por definição a redução de tamanho das partículas. O moinho de bolas é capaz de realizar esta cominuição através de atrito, compressão, impacto e abrasão, como afirma Luz et al. [5].

Os moinhos de bolas se caracterizam por ter uma câmara cilíndrica rotacional. Esta rotação promove o movimento interno das esferas moedoras de forma que haja a cominuição das partículas a serem moídas. Segundo Wills e Napier-Munn [6], moinhos de bolas se enquadram nos chamados moinhos de cargas cadentes, nos quais se caracterizam pela rotação interna e o livre movimento das esferas, como ilustra a Fig. 2.

Conforme Chaves e Peres [3], a velocidade da rotação é um fator determinante para a moagem efetiva. Na Fig. 3 no item “A” é possível ver o movimento da esfera com uma velocidade baixa empregada. Como ressalta Coulson et al. [7] a baixa velocidade de rotação não é interessante para o sistema, já que não acontece o esmagamento das partículas mas somente o deslizamento. Na Fig. 3 no item “B” a velocidade é mediana, sendo considerada ideal, isso porque é a que permite a quebra através da sua queda, quando ultrapassam o leito das bolas e caem novamente no

ponto inicial.

Figura 2: Movimento das esferas em um moinho.



Fonte: [7]

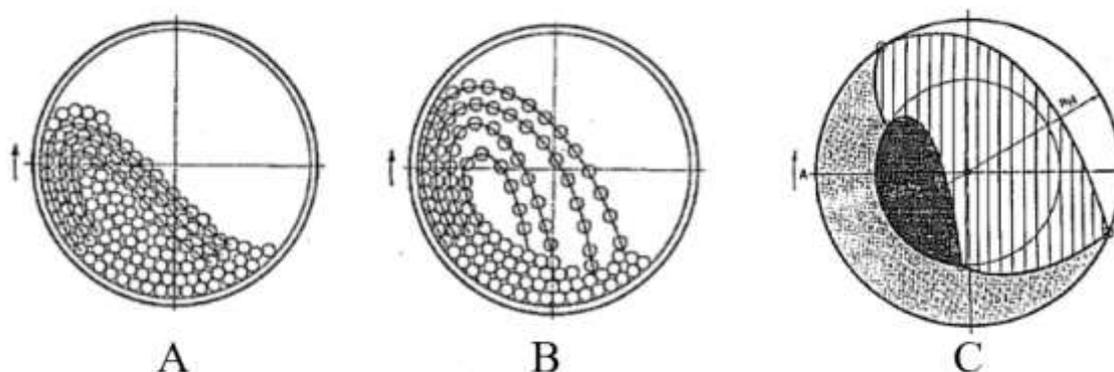
Como afirma Oliveira [4], a velocidade muito alta, assim como a baixa, não confere boa eficiência na moagem. Como é mostrada na Fig. 3 no item “C” a rotação alta faz com que as bolas entrem em movimento centrífugo o que não permite o atrito com o produto a ser moído, além de promover maior desgaste nos corpos moedores. Este fenômeno é chamado de velocidade crítica sendo considerado onde a esfera atinge o ponto mais elevado sem se soltar da parede, ou seja, representando a força centrífuga.

Segundo Luz et al. [5] a velocidade média de operação varia de 60 a 85% da velocidade crítica.

Como explica Coulson et al. [7] a taxa de alimentação influencia diretamente na eficiência da cominuição. Isto porque, quanto maior a taxa, menor será o tempo que esta permanecerá no moinho e conseqüentemente menor a efetividade da operação.

O diâmetro das esferas irá depender do que se pretende moer, porém, entende-se que, quanto menor a granulometria pretendida, menor deve ser o diâmetro do corpo moedor utilizado [7].

Figura 3: Velocidade de rotação em moinho de bolas.



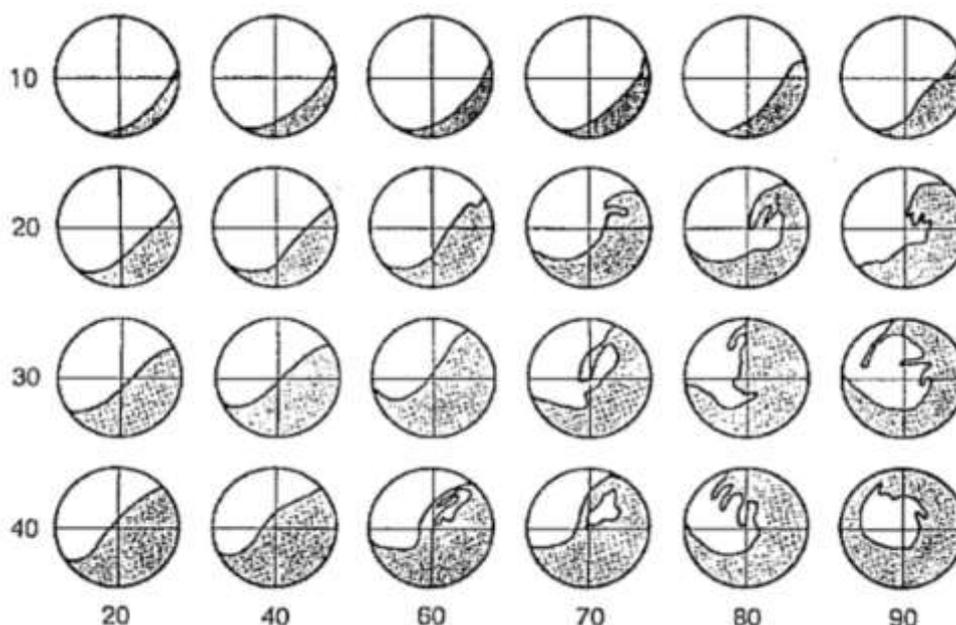
Fonte: Adaptada [3].

O grau de enchimento do cilindro é outro fator determinante segundo Oliveira [4], pois se as esferas moedoras não forem dosadas de forma coerente podem reduzir a velocidade de quebra devido ao acolchoamento do choque das bolas em volumes muito altos e o choque excessivo para volumes muito baixos.

Conforme Chaves e Peres [3] a velocidade e o grau de enchimento são diretamente relacionadas como está ilustrado na Fig. 4. A velocidade está expressa em porcentagem da velocidade crítica no eixo horizontal e o grau de ocupação está em porcentagem do volume interno no eixo vertical.

Como é possível observar na Fig. 4, o grau de enchimento de 10% do volume total não é capaz de proporcionar uma velocidade ideal, porém em 20% e 30% a velocidade ideal chega em 80% e 70% da velocidade crítica, respectivamente. Para 40% do grau de enchimento ocorre o acolchoamento das esferas e em 90% da velocidade crítica já ocorre o movimento centrífugo, portanto não é uma boa condição para a efetividade da moagem.

Figura 4: Relação da velocidade e ocupação do volume interno.



Fonte: [3].

2.2 CHILLER

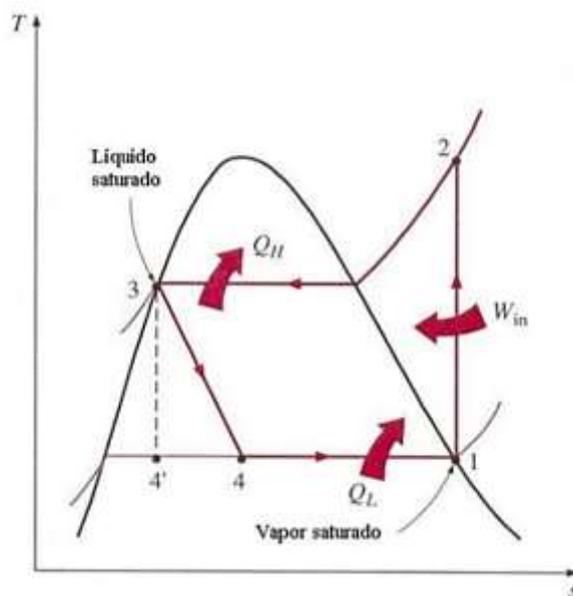
Segundo Machado [8], chiller é um equipamento para arrefecer a água, ou seja, resfriar de forma que passe por um ciclo termodinâmico até que perca todo o calor necessário e alcance a temperatura determinada.

Na Fig. 5 é ilustrado o ciclo de refrigeração baseado no ciclo de Carnot. Este inicia no ponto 1 onde acontece a compressão que recebendo trabalho, aumenta a pressão do sistema. Com isso o refrigerante se torna líquido e o calor é expulso do sistema através de convecção forçada, do ponto 2 ao 3, etapa chamada de condensação [9].

Segundo Matos [10], no ponto 3 em estado de líquido saturado, o refrigerante passa pela válvula de expansão diminuindo a pressão interna, o que torna possível que o líquido se torne gás novamente.

Do ponto 4 ao 1 é a etapa que compreende a evaporação. O líquido saturado entra em contato com a água a ser refrigerada e troca calor com a mesma, este processo faz com que ocorra a evaporação do refrigerante, ressalta Lopes [9].

Figura 5: Ciclo de refrigeração.



Fonte: [9].

Como afirma Lemos [11] existem dois tipos de Chillers de condensação, o de condensação a ar e o de condensação a água. O chiller em estudo tem em seu processo a condensação pelo ar ambiente. Este possui compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador como é ilustrado na Fig. 6.

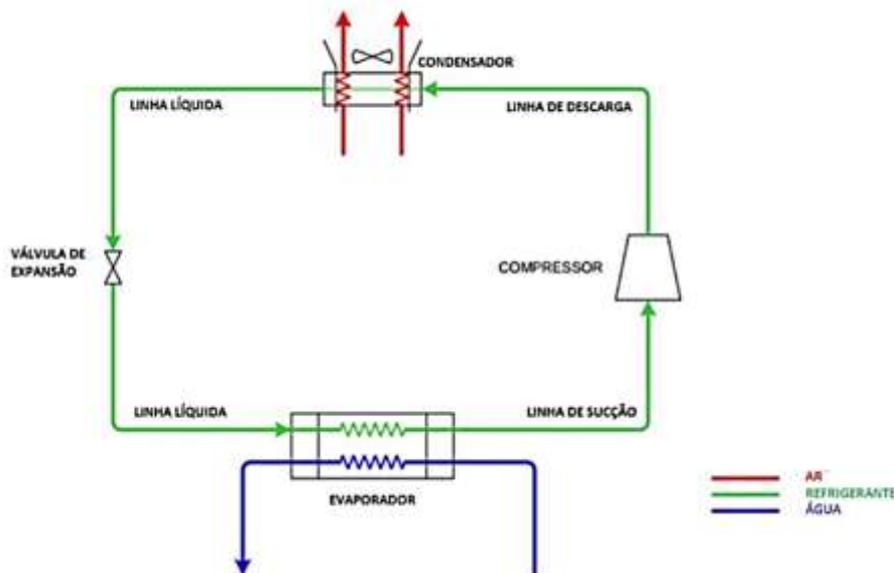
É no evaporador que a água do processo é resfriada, mas para que isto seja possível o refrigerante passa do estado líquido para o gasoso, como afirma Lopes [9].

No chiller que será utilizado no estudo a troca térmica acontece através de uma serpentina que há dentro do evaporador. Portanto, neste processo o refrigerante absorve o calor da água, que conseqüentemente, aquece. Diferente do que acontece com a água que perdendo calor, resfria, como ressalta Machado [8].

Conforme Lopes [9] o compressor é o responsável por aumentar a pressão do fluido de forma que faça com que o mesmo mude de fase. Este fenômeno somente é possível com a ajuda do condensador, que arrasta o calor e permite que a temperatura diminua até que o refrigerante se torne líquido.

De acordo com Machado [8], o condensador tem por objetivo passar o refrigerante do estado gasoso para o estado líquido, porém esta transformação de fase inicia-se na compressão.

Figura 6: Componentes do Chiller de condensação a ar.



Fonte: Adaptada [8].

Quando acontece a mudança de fase há calor sendo liberado mas este precisa ser rejeitado para o ar, ressalta Lemos [11], por isso é acoplado no equipamento um ventilador que promove a convecção forçada.

Segundo Lopes [9] a válvula de expansão diminui a pressão para que, quando este passar pelo evaporador, possa aumentar sua temperatura e trocar de fase de forma que seja possível o resfriamento do fluido de trabalho.

Machado [8] afirma que esta válvula também é a responsável por regular a vazão do fluido refrigerante conservando a estabilidade do processo.

2.3 FLUIDO REFRIGERANTE

Conforme Urbano [12] o R22 (clorodifluorometano) é um gás refrigerante amplamente usado para equipamentos que envolvam a refrigeração, desde ar condicionados residenciais à chillers industriais.

Matos [10] afirma que em 1974, Rowland e Molina, pesquisadores da Universidade da Califórnia realizaram estudos da ação dos clorofluorcarbonetos, conhecidos como CFC's na atmosfera e descobriram que, em contato com a forte radiação solar nesta área, o cloro se desprende da molécula e reage com o ozônio. Ou seja, constatou-se que os CFC's são grandes responsáveis pela diminuição da camada de ozônio.



De acordo com Antunes [13], a data estipulada pelo protocolo de Montreal para a eliminação dos CFC's, sendo eles R11, R12, R113, R114 e R115, foi de janeiro de 2010. O R22 está incluído no grupo dos HCFC's, embora não é tao nocivo quanto os CFC's este grupo também possui ação negativa à camada de ozônio.

Segundo Antunes [14] o refrigerante R22 foi o refrigerante mais usado atualmente, constatando a sua ampla utilização em sistemas de refrigeração. Em consumo de energia elétrica, foi responsável por 15% do consumo mundial, mas as consequências de seu uso resultam em 7% da emissão mundial de gases de efeito estufa.

Conforme Calm e Domanski [15], diversos estudos com outros refrigerantes menos nocivos ao meio ambiente estão sendo realizados e ainda não foi encontrado nenhum que se iguale em eficiência de refrigeração e que seja compatível nos mesmos equipamentos que já são utilizados o R22, porém encontrou-se vários possíveis substitutos que podem servir pra aplicações específicas.

2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO

Conforme Incropera e DeWitt [16] a condução é a transferência energética de partículas com mais energia para as com menos energia de uma mesma substância. Esta condução se deve a interação entre as moléculas.

Segundo Çengel [17], a condução do calor ocorre através de colisões e difusão nos movimentos moleculares quando em líquidos e gases. Entretanto, para sólidos a condução acontece com o transporte de elétrons livres. A condução depende de fatores como a diferença de temperatura, espessura e a condutividade térmica do material utilizado.

2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

Sólidos sempre sofrem a transferência por condução, por se tratar de moléculas imóveis. Porém, líquidos e gases podem ter sua transferência por condução ou convecção, explica Çengel [17]. A diferença entre os dois modos de transferência é o movimento do fluido, isto é, na transferência por condução o fluido é fixo e em convecção o fluido está em movimento.

A convecção promove maior troca térmica em comparação com a



condução, isso se deve ao fato de que o fluido em movimento proporciona maior contato entre partes frias e quentes aumentando a condução e, conseqüentemente, a transferência [17].

Segundo Incropera e DeWitt [16] a convecção pode ser classificada em natural ou forçada. A convecção forçada se deve a transferência através de meios externos, como bombas ou ventiladores por exemplo. Já a convecção natural se deve a movimentos por meios naturais, como o efeito do empuxo.

2.6 BALANÇO TÉRMICO

O evaporador nada mais é que um trocador de calor por serpentina interna. E para o balanço térmico do mesmo é necessário que se leve em consideração os valores de vazão dos fluidos, capacidade térmica dos fluidos calor latente dos materiais e as temperaturas de entrada e saída, conforme Junior [18].

Como afirma Souza [19], a troca térmica que acontece na água, fluido que está sendo refrigerado, ocorre unicamente pela diferença de temperatura que há entre este fluido e o refrigerante, por isso é utilizada para este processo a Eq. (1).

$$Q_e = \dot{m}_q \cdot C_{p,q} \cdot (T_{q, \text{sai}} - T_{q, \text{ent}}) \quad (1)$$

Onde:

Q_e = taxa de transferência de calor no evaporador (kJ.h^{-1});

\dot{m}_q = vazão mássica do fluido quente (água) (kg.h^{-1});

$C_{p,q}$ = capacidade térmica do fluido quente (água) ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$);

$T_{q, \text{sai}}$ = temperatura de saída do fluido quente (°C);

$T_{q, \text{ent}}$ = temperatura de entrada do fluido quente (°C).

Entretanto, conforme Souza [19], com o fluido refrigerante a troca térmica se deve à mudança de fase e conseqüente perda de calor e aumento da temperatura do mesmo, por este motivo a Eq. (2) será utilizada.

$$Q_e = \dot{m}_f \cdot C_{L,f} \quad (2)$$



Onde:

Q_e = taxa de transferência de calor no evaporador (kJ.h^{-1});

\dot{m}_f = vazão mássica do fluido frio (R22) (kg.h^{-1});

$C_{L,f}$ = calor latente do fluido frio (R22) (kJ.kg^{-1}).

Para o condensador é utilizada a Eq. (3), conforme Matos [10].

$$Q_c = \dot{m}_f \cdot (h_2 - h_3) \quad (3)$$

Onde:

\dot{m}_f = vazão mássica do fluido frio (R22) (kg.h^{-1});

Q_c = taxa de transferência de calor no condensador (kJ.h^{-1});

h_2 = entalpia do ponto 2 conforme Fig. 5 (kJ.kg^{-1});

h_3 = entalpia do ponto 3 conforme Fig. 5 (kJ.kg^{-1}).

Segundo Matos [10], o trabalho realizado pelo compressor para aumentar a pressão e tornar o refrigerante liquefeito pode ser encontrado através da Eq. (4).

$$Q_e + W_{cp} = Q_c + Q_{cp} \quad (4)$$

Onde:

Q_e = taxa de transferência de calor no evaporador (kJ.h^{-1});

Q_c = taxa de transferência de calor no condensador (kJ.h^{-1});

W_{cp} = trabalho no compressor (kJ.h^{-1});

Q_{cp} = taxa de transferência de calor no compressor (kJ.h^{-1}).

Como afirma Matos [10], Q_{cp} tem valor desprezível por se tratar de uma compressão adiabática reversível, podendo ser adotado como nulo.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A pesquisa trata-se do resfriamento de água para a produção de pasta de pigmentos em uma indústria de tintas flexográficas no Sul de Santa Catarina. O

equipamento utilizado para este resfriamento é um chiller de condensação a ar ambiente que opera com o fluido refrigerante R22 (Clorodifluormetano) como é ilustrado na Fig. 7. É apresentado como “1” o condensador, este recebe o ar ambiente perdendo o calor através de convecção. O “2” está indicando onde o compressor está localizado no equipamento. A tubulação que indica a entrada de água no chiller é indicada pelo número “3” e a saída pelo “5”. Já o evaporador fica na parte de trás do equipamento onde está a indicação com o número “4” na figura.

A análise que será feita neste trabalho será avaliada a possibilidade de implantar um ou mais moinhos ao mesmo sistema de refrigeração, verificando através dos cálculos, se o chiller já existente é capaz de suportar a demanda térmica requerida.

Figura 7: Chiller de condensação a ar em estudo.



Fonte: Do autor (2018)

A água refrigerada é enviada para os moinhos de bolas de pigmentos que a Empresa possui, sendo um deles ilustrado na Fig. 8. No item de número “3” na Fig. 8 é onde acontece a moagem úmida dos pigmentos, este cilindro é composto por outro cilindro concêntrico, sendo o interno que faz a moagem e o externo que realiza a passagem da água, efetuando assim a troca térmica. O ponto de número “2” é onde entra a água refrigerada, vindo direto do chiller em estudo, e o “1” é a saída da água que é transportada até o chiller para ser refrigerada novamente.

Figura 8: Moinho de bolas com refrigeração a água.



Fonte: Do autor (2018)

3.1 MEDIÇÃO DA VAZÃO DE ÁGUA

A vazão de água utilizada é um valor definido pelo equipamento, o qual não se altera com o tempo. O valor fornecido é de 18 m³/h.

3.2 DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS DA ÁGUA

A temperatura que a água sai do chiller deverá estar entre 8°C e 12°C. Isto se deve ao processo de resfriamento que acontece no moinho, considerando que se a temperatura de saída da água estiver muito alta o resfriamento da pasta não será suficiente, podendo causar danos ao selo mecânico do moinho, bem como na qualidade da pasta. Por outro lado, se a temperatura estiver mais baixa que 8°C pode fazer com que a pasta perca muito calor e aumente consideravelmente sua viscosidade, o que atrapalha a moagem, podendo até entupir as peneiras e dessa forma atrasar a sua produção.

A temperatura que a água sai dos moinhos pode ser definida pelo próprio equipamento como é ilustrado na Fig. 8 no item “1”. Porém, o valor de temperatura mais preciso para esta utilização são os valores encontrados no chiller, como é possível observar na Fig. 9. Isto se deve por ser considerada a perda de calor entre as tubulações que ligam o moinho ao chiller.

Figura 9: Leitura das temperaturas da água no chiller.



Fonte: Do autor (2018)

3.3 TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO EVAPORADOR

Através dos resultados já obtidos e com o valor de capacidade calorífica em literatura é possível calcular a taxa de transferência de calor para a água no evaporador. Este cálculo será feito com o auxílio da Eq. (1).

A capacidade nominal do sistema, dado do próprio equipamento, é de $75000 \text{ kcal.h}^{-1}$, sendo necessário avaliar se o valor da taxa de transferência de calor do evaporador vai alcançar este valor.

3.4 VAZÃO DO FLUXO FRIO (R22)

Para o cálculo da vazão do R22 será utilizada a taxa encontrada anteriormente e o calor latente em literatura. Com estes valores a vazão é obtida com a Eq. (2).

3.5 ENTALPIAS

Para que seja possível obter o valor da entalpia, será utilizada uma tabela de propriedades termodinâmicas de Moran e Shapiro [20]. Para que se encontre o valor da entalpia em kJ.kg^{-1} , como é necessário para os cálculos, é preciso que se obtenha primeiro o valor da pressão em psi e a temperatura em $^{\circ}\text{F}$ do refrigerante no



instante que este entrar na condensação. Lembrando que estas unidades são necessárias por se tratar da tabela em questão, após a obtenção do valor de entalpia as unidades são convertidas para kJ.kg^{-1} . A pressão é conseguida através dos compressores do próprio equipamento e a temperatura é a de saturação encontrada na mesma tabela.

3.6 TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO CONDENSADOR

A taxa de transferência de calor no condensador será calculada considerando a entalpia na mudança de fase que ocorre nesta etapa. As entalpias serão obtidas na literatura e a vazão utilizada será a mesma que foi calculada anteriormente, através da Eq. (3).

3.7 O TRABALHO REALIZADO NO COMPRESSOR

Considerando-se que o trabalho somente será realizado no compressor, a Eq. (4) compreende os valores de taxa de transferência no evaporador e condensador. A taxa de transferência no compressor é desprezível por não haver troca de temperatura.

3.8 DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE MOINHOS

Para a realização dos cálculos necessários para a determinação do número máximo de moinhos no processo, foram obtidos valores de temperatura da água, pressão e temperatura ambiente do ar, não só com três moinhos em operação, mas também quando em momentos determinados havia somente dois ou um moinho em operação. Com isso foi possível calcular a diferença de Q_e e W_{cp} quando se é adicionado um moinho no processo.

Essa diferença deve ser comparada juntamente com as temperaturas ambientes encontradas no momento da medição.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os dados obtidos no equipamento em questão, estes estarão em forma de tabelas e figuras.

4.1 DADOS DO CHILLER

Inicialmente foram coletados dados do chiller (Tab. 1), para realização dos cálculos propostos. As oito amostras foram coletadas em momentos que os três moinhos estavam em funcionamento, isto porque o objetivo foi avaliar a possibilidade de implantação de mais calor ao sistema e por esse motivo a seguinte análise foi feita quando todos os moinhos estavam em operação.

Tabela 1: Dados obtidos do chiller e temperatura ambiente.

Amostra	Temperatura de saída (°C)	Temperatura de entrada (°C)	Pressão de entrada (psig)	Pressão de saída (psig)	Temperatura ambiente (°C)
1	11,9	12,7	20	340	28,4
2	11,0	12,2	20	340	25,7
3	12,4	12,8	20	340	29,0
4	11,0	13,5	20	340	23,0
5	12,1	13,8	20	340	27,0
6	11,4	13,1	20	340	26,0
7	11,7	13,5	20	340	26,8
8	12,0	13,1	20	340	26,2

Fonte: Do autor (2018)

4.2 RESULTADOS DE TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO EVAPORADOR (Qe)

Com os dados da Tab. 1 é possível calcular a taxa de transferência de calor do evaporador, isto porque também foram coletados alguns dados importantes, como o Cp da água sendo considerado 4,186 kJ/kg.°C e a vazão da água de 18000 kg/h. Através da Eq. (1) é possível encontrar os valores de Qe apresentados na Tab. 2.

Considerando que a temperatura de saída é menor que a temperatura de entrada, a taxa de transferência de calor no evaporador, automaticamente, será negativa. Isto se explica também com o estudo da troca térmica que acontece no evaporador, isto porque o fluido está perdendo calor ao ser resfriado.



Tabela 2: Resultados de taxa de transferência de calor no evaporador (Q_e).

Amostra	Q_e (kJ.h ⁻¹)
1	-60278,4
2	-90417,6
3	-30139,2
4	-188370,0
5	-128091,6
6	-128091,6
7	-135626,4
8	-82882,8

Fonte: Do autor (2018)

Como informado pelo fabricante, o equipamento é capaz de suportar uma troca térmica de 75000 kcal.h⁻¹, que equivale a 313800 kJ.h⁻¹. Ou seja, em nenhuma das amostras este resultado foi atingido.

Isso significa que em todas as temperaturas que o chiller foi submetido neste trabalho, a taxa de transferência no evaporador não atingiu seu valor nominal, ou seja, seu máximo. Portanto, ainda se torna possível a adição de mais calor ao processo, pois o chiller ainda é capaz de suportar a troca térmica requerida. Porém, a implantação de um ou mais moinhos deve ser quantificada com o estudo da variação de temperatura de entrada e saída no chiller.

4.3 RESULTADOS DE VAZÃO DO FLUIDO FRIO

Através dos resultados obtidos pela taxa de transferência no evaporador (Tab. 2) é possível encontrar resultados de vazão do fluido frio. Primeiramente foi encontrado o calor latente do R22 em kJ.kg⁻¹, sendo este -197, e com auxílio da Eq. (2) foram obtidos os valores apresentados na Tab. 3.

Nota-se que o valor de calor latente é negativo, isso ocorre por se tratar de um fluido que está cedendo calor, ou seja, um processo exotérmico.

Os resultados obtidos na Tab. 3 foram necessários para o cálculo da taxa de transferência do condensador (Eq. 3).



Tabela 3: Resultados de vazão do fluido frio.

Amostra	mf (kg.h ⁻¹)
1	305,98173
2	458,97259
3	152,99086
4	956,19289
5	650,21117
6	650,21117
7	688,45888
8	420,72487

Fonte: Do autor (2018)

4.4 RESULTADOS DE ENTALPIA COM BASE NA PRESSÃO

Para que sejam encontrados os valores das entalpias de entrada e saída do compressor, foi primeiramente coletado os dados de pressão como está expresso na Tab. 1. Através da “tabela de propriedades do vapor de refrigerante 22 superaquecido”, disponibilizada por Moran e Shapiro [20] e considerando-se temperatura de saturação, por se tratar do fluido no momento de sua condensação, foi possível encontrar os resultados de entalpia apresentados na Tab. 4.

Tabela 4: Resultados de entalpia obtidos.

Amostra	h2 (kJ.kg ⁻¹)	h3 (kJ.kg ⁻¹)
1	236,13552	262,20068
2	236,13552	262,20068
3	237,06592	262,16346
4	236,13552	262,20068
5	236,13552	262,20068
6	236,13552	262,20068
7	236,13552	262,20068
8	236,13552	262,20068

Fonte: Do autor (2018)

Estes dados foram obtidos para que fosse possível calcular a taxa de transferência de calor no condensador (Eq. 3).



4.5 RESULTADOS DE TAXA DE TRANSFERÊNCIA NO CONDENSADOR (Q_c)

O cálculo da taxa de transferência de calor no condensador foi realizado através da Eq. (3), para isto foram utilizadas as entalpias anteriormente encontradas. Os valores obtidos são apresentados na Tab. 5.

Tabela 5: Resultados da taxa de transferência de calor no condensador.

Amostra	Q_c (kJ.h ⁻¹)
1	-7975,46
2	-11963,19
3	-3839,69
4	-24923,32
5	-16947,86
6	-16947,86
7	-17304,25
8	-10966,26

Fonte: Do autor (2018)

A taxa de transferência no condensador foi obtida com o objetivo de calcular o trabalho (Eq. 4).

4.6 RESULTADOS DE TRABALHO (W)

Os trabalhos encontrados, com o auxílio da Eq. (4), foram obtidos e são apresentados na Tab. 6.

O trabalho nominal no equipamento, ou seja, o máximo que este suporta, é de 192600 kJ.h⁻¹. Portanto nenhum dos resultados apresentados na Tab. 6 ultrapassaram estes valores.

Para que seja quantificada a possibilidade de implantação de um ou mais moinhos no processo produtivo é necessário que primeiramente seja obtido o Q_c , levando-se em consideração o estudo da diferença de temperatura e a correlação com a quantidade de moinhos no processo atual.



Tabela 6: Resultados de trabalho.

Amostra	Wcp (kJ.h ⁻¹)
1	52302,94
2	78454,41
3	26299,51
4	163446,68
5	111143,74
6	111143,74
7	118322,15
8	71916,54

Fonte: Do autor (2018)

4.7 DETERMINAÇÕES DO NÚMERO DE MOINHOS

Para a determinação do número de moinhos que é possível adicionar ao processo, foi necessária a coleta de dados do chiller. No presente trabalho foram coletadas 25 amostras em que as variáveis foram a temperatura ambiente do ar e o número de moinhos que estavam em operação no momento da coleta.

Com os dados coletados pode-se fazer uma estimativa do valor de taxa de transferência de calor no evaporador (Q_e) bem como do trabalho requerido (W_{cp}).

Foram coletados dados com três e com dois moinhos em operação em diferentes temperaturas como é apresentado na Tab. 7. Com isso a diferença de taxa (Q_e) foi determinada, porém observou-se que essa diferença diminui com a redução da temperatura.

Tabela 7: Dados coletados em temperatura de 30,5°C.

Número de moinhos	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)	Pressão de entrada (psig)	Pressão de saída (psig)
3	11,3	13,2	20	340
2	11,6	12,8	20	340

Fonte: Do autor (2018)

Portanto a temperatura que será analisada será a maior coletada neste trabalho, neste caso, de 30,5°C. E assim observar se o valor obtido alcança o valor



nominal. Deve-se considerar na Tab. 8 que os valores de dois e três moinhos são os dados coletados, já em quatro, cinco e seis moinhos são valores estimados.

Observou-se através da Tab. 8 que o valor de Q_e ultrapassou o seu valor nominal, de 313800 kJ.h^{-1} , quando estimados 6 moinhos no processo. Porém, para o valor de W_{cp} o valor nominal, 192600 kJ/h^{-1} , foi alcançado em cálculos de 5 moinhos estimados. Valores nominais de Q_e e W_{cp} foram obtidos com através das informações do próprio chiller em estudo.

Tabela 8: Estimativa de Q_e e W_{cp} em $30,5^\circ\text{C}$.

Número de moinhos	Q_e (kJ/h)	mf (kg/h)	h2 (kJ/kg)	h3 (kJ/kg)	Q_c (kJ/h)	W_{cp} (kJ/kg)
6	-339066,00	1721,15	236,14	262,2	-44853,10	294212,90
5	-248648,40	1262,17	236,14	262,2	-32892,27	215756,13
4	-195904,80	994,44	236,14	262,2	-25915,12	169989,68
3	-143161,20	726,71	236,14	262,20	-18941,72	124219,48
2	-90417,60	458,97	236,14	262,20	-11963,19	78454,41

Fonte: Do autor (2018)

5 CONCLUSÕES

Sendo o objetivo principal do presente trabalho a análise da possibilidade de implantação de um ou mais moinhos no processo, foi possível quantificar por meio de cálculos termodinâmicos, a quantidade máxima para uma temperatura de $30,5^\circ\text{C}$. Com isso é possível observar quanto o chiller vai suportar com temperaturas mais extremas, neste caso, o máximo obtido.

Com o experimento e os cálculos realizados é possível comprovar que é possível a implantação de somente mais um moinho, sendo o máximo permitido 4 moinhos no processo. Isto porque o trabalho realizado no compressor ultrapassou seu valor nominal quando feita a estimativa com 5 moinhos.

No trabalho foi observado que a temperatura ambiente altera diretamente a eficiência do chiller, por se tratar de condensação a ar. Portanto seria interessante para trabalhos futuros utilizar temperaturas ainda maiores para ver o máximo do equipamento e possibilidade real de implantação considerando dias em que a temperatura ambiente seja superior. Isto porque, com o aumento da temperatura deve ser observada a possibilidade do trabalho no compressor (W_{cp}) alcançar seu valor máximo, o que poderia ocasionar em custos de manutenção elevados. Além disso, se



a Empresa precisar usar mais que 4 moinhos seria importante definir qual a capacidade energética necessária para a compra de um novo chiller.

REFERÊNCIAS

[1] SANTOS, G. S. **Implantação de ferramentas da qualidade em uma indústria do setor flexográfico**. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 75 f. 2016.

[2] LOYOLA, R. O. **Processo de impressão flexográfica ao papelão ondulado**. Monografia (Curso de Especialização em Embalagem). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 64 f., 2013.

[3] CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios**: Britagem, peneiramento e moagem. 2. ed. São Paulo: Signus Editora, 2003.

[4] OLIVEIRA, R. F. **Uma Revisão dos Princípios de Funcionamento e Métodos de Dimensionamento de Moinhos de Bolas**. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 60 f., 2012.

[5] LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de Minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: Cetem-mct, 2004.

[6] WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. **Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. Burlington: Elsevier, 2006.

[7] COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F.; BACKHURST, J. R.; HARKER J. H. **Coulson & Richardson's Chemical engineering: Particle technology and Separation Processes**. Volume.2, 5 ed. Londres, 2002.

[8] MACHADO, L. E. A. **Projeto de controle de automação predial para um sistema híbrido de climatização com alta eficiência energética**. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Controle e Automação). Universidade de Brasília, Brasília, 113 f., 2015.



[9] LOPES, M. A. **Projeto e Simulação de Resfriadores de Líquidos**. Disponível em: <<http://www.mecanica-poliusp.org.br/05pesq/cont/pdf/718.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2017.

[10] MATOS, R. S. **Refrigeração. Disciplina de Refrigeração e Climatização**. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 243 p. 2014.

[11] LEMOS, C. M. R. **Métodos Expeditos Indirectos de Análise de Eficiência de Equipamentos de Produção de Energia Térmica, nomeadamente Chillers**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 105 p., 2011.

[12] URBANO, J. J. **Análise comparativa da performance de unidades de ar condicionado tipo janela usando R22, R290 e R600a**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 114 p., 2008.

[13] ANTUNES, A. H. P. **Análise experimental da eficiência energética de um sistema de refrigeração automatizado utilizando R22 e propileno como fluido refrigerante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 134 p., 2011.

[14] ANTUNES, A. H. P. **Processo de substituição de R22 em sistemas de refrigeração comerciais**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 136 p. 2014.

[15] CALM, J. M.; DOMANSKI, P. A. **Substituição do R-22: Panorama atual**. Abrava Informação & Negócios. n. 223, p. 40-45, 2005.

[16] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

[17] ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**. 3. ed. São Paulo: Mcgraw-hill Interamericana do Brasil, 2009.

[18] JÚNIOR, J. A. S. **Análise de um trocador de calor tipo serpentina de uma planta de hipoclorito de sódio**. TCC (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, 49 f., 2016.



[19] SOUZA, M. S. **Análise térmica de um trocador de calor do tipo casco e tubos para resfriamento do resíduo de uma unidade de destilação atmosférica.** TCC (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 44 p., 2013.

[20] MORAN, M.J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia.** 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.