

REVISTA DA FATEC GUARULHOS
Gestão, Tecnologia & Inovação
v. 1, nº 9 (2024)
ISSN: 2448-4458

PROPOSTA DE UM SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DO VAPOR DE ÁGUA DO PROCESSO DE ATOMIZAÇÃO DE PÓS METALICOS

Proposal for a Vapor Recovery System of the Metal Powder Atomization Process

Alex Nakauti Kiyomoto¹; Silvia Pierre Irazusta²; Francisco Tadeu Degasper³

¹Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – CEETEPS/ Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa - UPEP, São Paulo/SP, Brasil. E-mail: alex.kiyomoto@cpspos.sp.gov.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0851-3015>

²Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo unidade Sorocaba - FATEC SOROCABA, Sorocaba/ SP, Brasil. E-mail: silvia.irazusta@fatec.sp.gov.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6856-4035>

³Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo – FATEC SÃO PAULO, São Paulo/SP, Brasil. E-mail: ftd@fatecsp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8086-7709>

Resumo

A produção industrial do pó de ferro, utilizando a atomização a água, envolve uma vasta cadeia de processos desde a obtenção da matéria prima até o produto final. Estima-se que o teor de ferro, no pó produzido por este método, seja superior a 99,5%, contudo, isto se dá com um grande consumo de energia e água, em que aproximadamente 34 % do volume é transformado na forma de vapor. A complexidade na gestão do consumo e utilização da água consumida na produção, é um grande desafio na metalurgia do pó. A partir desta demanda o objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade técnica da recuperação do vapor d'água eliminado na atomização, permitindo o retorno desse volume para outras aplicações. Admitindo-se o cenário real, foi desenvolvido um modelo teórico de sistema para recuperação de vapor de água eliminado no processo. Foi realizado o dimensionamento de um trocador de calor aletado, a partir de dados coletados no sistema de produção de uma empresa metalúrgica localizada no interior do Estado de São Paulo. O modelo demonstrou a viabilidade técnica de otimização na recuperação de recursos, baseando-se na eficiência da troca térmica do aparelho, bem como no custo do fornecimento de água, oferecendo a empresa mais uma ferramenta para a gestão de recursos. Foi prospectada, uma recuperação do vapor de água do processo, de até 90% pelo modelo construído, fornecendo um dimensionamento customizado para a construção do trocador de calor.

Palavras-chave: Metalurgia do Pó; Trocador de Calor; Sustentabilidade.

REVISTA DA FATEC GUARULHOS

Gestão, Tecnologia & Inovação

v. 1, nº 9 (2024)

ISSN: 2448-4458

Abstract

The industrial production of iron powder using water-atomization procedure involves a vast chain of processes ranging from the acquisition of raw material to the final product. It is estimated that the iron level produced by this method surpasses 99,5%, although this result demands a higher consumption of energy and water, in which 33% of the volume is transformed in the form of steam. The management complexity of water consumption and its use in this production is a crucial challenge in powder metallurgy. Based on this demand, the object of this paper is to evaluate the technical feasibility of recovering the water vapor, which was eliminated during the atomization process, allowing the return of this volume to be used in other applications. According to the current scenario, a theoretical model of water vapor recuperation was developed. By collecting data in the production system of a metallurgical company located in the countryside of São Paulo, a scaling of a finned heat exchanger was produced. The model has shown the technical feasibility of optimizing the recovery of resources based on the efficiency of the device's heat exchange, as well as the costs of water supply, and it offers the company a new tool for resource management. While using the model, a recovery of up to 90% of the water vapor was prospected, providing a customized scale for the heat exchanger construction.

Keywords: Powder metallurgy; Heat Exchanger; Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A metalurgia do pó (MP) é um processo da metalurgia de transformação que usa a conformação metálica de materiais para obtenção do pó de ferro, este com ampla gama de aplicações (HRYHA; WENDEL, 2018). É uma técnica altamente produtiva, utilizada, por exemplo, para a fabricação de peças do setor automotivo dentro de tolerâncias muito pequenas com características estruturais e físicas muito específicas (CHIAVERINI, 1992).

Os processos da metalurgia do pó para materiais particulados são tecnicamente denominados P/M² que em engenharia, significa materiais que possuem diâmetros entre 0,1 á 200 µm e são provenientes de uma série de tecnologias como a dos pós metálicos (GERMAN M., 2005,p.2-5).

2. REVISÃO DA LITERATURA

O método de obtenção de pós metálicos com foco na atomização a água, inicia-se com a seleção da sucata metálica e de obsolescência que são provenientes de diversos fornecedores como a indústria automotiva, fornece resíduos de estamparias, os sucateiros que coletam diversos materiais metálicos como partes de máquinas de lavar e geladeiras e as empresas que recolhem sucatas de outras industrias metalúrgicas. Alojados no pátio de sucatas, os materiais são classificados por tamanho, densidade e quantidade de impurezas que influenciam diretamente no rendimento metálico (LOPES, 2022). Importante apontar que a separação da sucata envolve alto grau de trabalho manual onde as atividades de coleta, separação e distribuição de resíduos metálicos que abastecem as metalúrgicas, podem oferecer riscos ocupacionais aos trabalhadores, como exemplo a exposição a vibrações e ruído e aos riscos ergonômicos o que demanda uma análise preliminar dos riscos ambientais e ocupacionais para que medidas preventivas e/ou mitigatórias sejam tomadas (MEDEIROS; SANTOS, 2019).

A etapa seguinte consiste em abastecer os altos fornos. A eletricidade tem sido amplamente utilizada como matriz energética para a fusão e refino de metais, sendo o forno elétrico a arco (FEA) o representante totalitário nas aciarias por serem os mais

REVISTA DA FATEC GUARULHOS

Gestão, Tecnologia & Inovação

v. 1, nº 9 (2024)

ISSN: 2448-4458

eficientes. Neste modelo de forno utilizam-se altas potências energéticas entre 50 a 80 MW dependendo da capacidade do FEA, aliada a energia química na forma de carbono, oxigênio ou gás natural utilizadas como catalizadores do processo de fusão cujo o ferro fundido contido em seu interior atinge uma temperatura de até 1800 °C (GAJIC et al., 2016). Com um consumo médio de 400 a 500 kWh de energia elétrica por tonelada de sucata. Nos Altos-Fornos, como o (FEA), formam um sobrenadante, denominado escória, que é constituída de uma mistura formada de óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO₂), óxido de magnésio (MgO), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxidos de ferro resultantes da fusão de impurezas e fundentes de metais e minérios durante os processos metalúrgicos. São resíduos atrativos devido a elevada produção nas aciarias e a possibilidade de seu reuso, uma vez que 56% deste material é estocado como matéria prima de outros produtos, como na construção civil e na produção industrial de fertilizantes constitui um exemplo de aplicação do conceito de economia circular (Logar e Škrjanc, 2021).

O material fundente, filtrado e sem escoria é despejado em uma panela por gravidade e posteriormente para o atomizador. Para German (2005,p.7-8), as técnicas de atomização industrial para obtenção de pós de partículas são desejadas, uma vez que podem ser aplicadas a muitos metais ou ligas metálicas e propiciam um satisfatório controle no processo produtivo. A água é um dos elementos usados para fragmentar correntes descendentes de metais em estado de fusão, abaixo de 1600 °C, por meio de jatos de alta pressão que solidificam rapidamente o metal líquido, promovendo o seu fracionamento. Esse processo é amplamente empregado na produção de pós de ferro, por ser economicamente melhor. Assim, é estabelecido, segundo German (2005,p.7-8), que a vazão mássica comum neste processo é de 5 Kg de água para cada Kg de pó e as variáveis mais importantes deste processo são a pressão e a velocidade dos jatos de água, onde altas pressões ou altas velocidades dentro do atomizador resultam em particulados metálicos. As pressões de água utilizadas dentro do atomizador variam de 35x10⁵ a 210x10⁵ Pa, associadas a velocidade da água de 40 a 150 m/s. O fundo da câmara do atomizador pode

ser protegida por um gás inerte, como o nitrogênio, o que impede a oxidação do pó (CHIAVERINI, 1992,p.19).

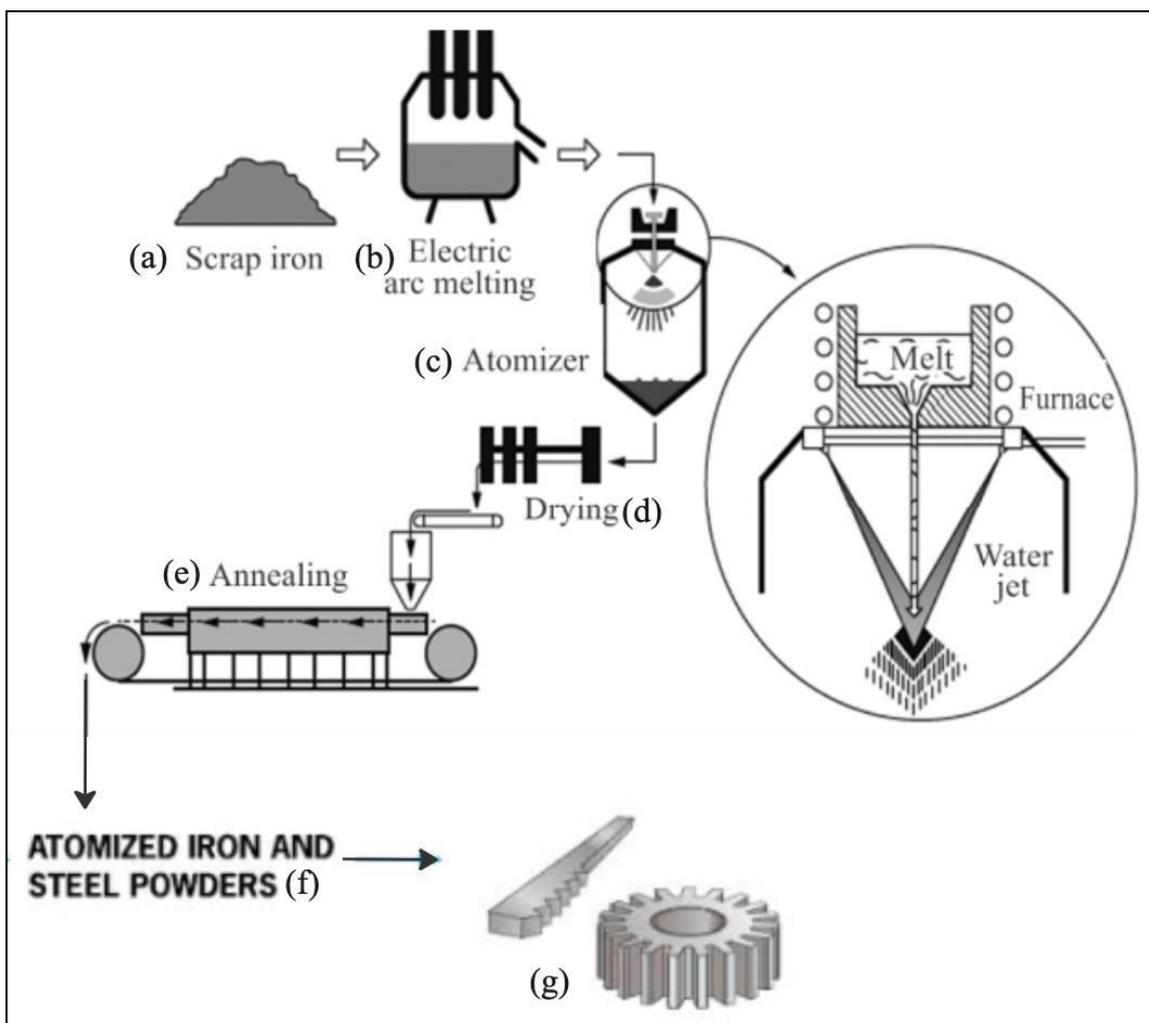
As partículas solidificadas formadas no fundo da câmara do atomizador juntamente com o excesso de água do processo, formam um composto denominado “lama”. Este produto é levado ao secador rotativo com intuito de remover água. O oxigênio da água e da atmosfera dentro do atomizador oxida o pó ferroso. O excesso de óxidos e de carbono são indesejáveis no pó, logo, este é conduzido ao recozimento em fornos contínuos.

Os pós metálicos obtidos no processo de atomização a água, são considerados um conjunto de partículas, cuja propriedade mais importante é a razão entre a área de sua superfície e o volume, o que lhe proporciona características entre o sólido e o líquido, permitindo com que preencham, por ação da força gravitacional, cavidades específicas de moldes das mais variadas especificações (GERMAN, 2005,p.2-5). O pó é usado na confecção de peças metálicas em condições muito específicas e restritivas que, em geral não demandam operações de usinagem secundárias e são utilizados principalmente no setor automotivo como, por exemplo, componentes do motor, direção, suspensão e freios (CHIAVERINI, 1992,p.2).

Estima-se que o teor de ferro produzido pela atomização a água é maior que 99,5%, e em todas as etapas fabris da produção dos pós de ferro possuem elevado consumo de recursos como energia elétrica e água. Portanto revisões sistêmicas, explorando a fabricação de pós de ferro de maneira sustentável devem ser exploradas (HE et al., 2019). O processo, conforme explicado acima está ilustrado na Figura 1, onde (a) representa a sucata metálica, (b) o forno elétrico a arco (FEA), (c) o sistema de atomizador a água, (d) o secador rotativo, (e) o forno contínuo de recozimento, (f) pós metálicos provenientes do processo e (g) peças metálicas confeccionadas a partir dos pó de ferro. O reaproveitamento do vapor de água envolve dois princípios termodinâmicos: a transferência de calor e a transferência de massa. A transferência de energia na forma de calor é a energia térmica em movimento devido a diferença de temperatura entre os meios, em que um gradiente de temperatura é chamado de força motriz. Analogamente, na

transferência de massa, a força motriz é a concentração da espécie em uma dada mistura (INCROPERA; WITT, 2014, p.35-36).

Figura 1 - Segmento do processo de atomização a água para produção de pós metálicos



Fonte: Adaptado Kruzhanov (2018)

Existem mecanismos de transferência de calor que determinam como a energia é transferida entre materiais e entre o ambiente por unidade de tempo, denominadas equações de taxa, dentre eles a condução e a convecção. Quando moléculas vizinhas de um gás, por exemplo, transferem energia térmica entre si, tratamos do mecanismo de

condução que abrange, até certo ponto, todos os sólidos, líquidos ou gases em que existam gradientes de temperatura (GEANKOPLIS, 2003, p.235-236).

Na convecção, o calor é transferido em grandes quantidades por uma mistura macroscópica de porções frias com porções quentes de um gás ou líquido (GEANKOPLIS, 2003, p. 237). A natureza do escoamento do fluido classifica a convecção em duas variantes. A primeira, quando este escoamento é causado por meios externos, como acontece com as correntes convectivas criadas pelo ventilador, chamada de convecção forçada e outra, quando o escoamento do fluido é provocado por forças de empuxo provenientes da diferença de densidades causadas por variações de temperatura do fluido, denominada convecção natural. Na transferência de calor por convecção a energia transferida é a energia sensível ou térmica interna do fluido. Em alguns processos de convecção existe troca de calor latente, associada a mudança de fase entre os estados líquidos e de vapor de um fluido (INCROPERA; WITT, 2014, p.41-44).

A condensação, classificada como troca de calor convectiva por conta da movimentação do fluido, leva em consideração o efeito do calor latente associado a mudança de fase. Ocorre quando a temperatura de um fluido, no estado de vapor, é menor que a temperatura de saturação e pode ser formado em contato com superfícies. Como o condensado cria uma resistência a transferência de calor entre o vapor e a superfície, é recomendado utilizar superfícies em disposição horizontal (INCROPERA; WITT, 2014, p.1105 - 1133).

Deste modo, considerando-se que, no interior da câmara do atomizador ocorrem diversos processos físicos e químicos com geração de um grande volume de vapor de água que é dispensado para a atmosfera, o objetivo deste estudo foi propor a recuperação deste vapor de água, por meio de sua condensação, utilizando-se um trocador de calor, do tipo aletado. Esta alternativa, atenderia ao conceito de economia de recursos e reaproveitamento de co-produtos, pela possibilidade de reutilização da água recuperada nos diferentes processos internos da empresa.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O modelo foi desenvolvido partindo de um cenário real, que foi o processo de produção da empresa Höganäs, que está no Brasil desde 1999. Sua sede administrativa, localizada na Vila Suíça, no distrito de Cesar de Souza em Mogi das Cruzes, opera para atender clientes do mercado brasileiro e de toda América do Sul. A técnica comercial envolvida na produção de pós metálicos na sede brasileira, refere-se ao processo de atomização a água, no qual o ferro é fundido e submetido a jatos pressurizados de água produzindo o pó de ferro puro. Dentro deste processo, uma avaliação ambiental destacou a utilização do recurso água, particularmente a perda de grandes volumes de água na forma de vapor, apontando uma oportunidade de intervenção. detectou-se a. A partir disso foi desenvolvido e proposto um modelo viável de sistema de recuperação do vapor d'água emitido.

O sistema de reaproveitamento do vapor de água gerado pelo processo de atomização a água foi modelado com a objetivo de melhorar o desempenho na utilização desse recurso, reduzindo a dependência no seu fornecimento, levando a maior eficiência do processo.

3.1 Definição do trocador de calor

As variáveis do processo requeridas para o cálculo do dimensionamento do trocador de calor foram a vazão de água que entra no aparelho, dimensões da tubulação de transporte de vapor para a atmosfera, temperatura e velocidade do vapor ao atingir o exterior da aciaria, coletados em duas bateladas consecutivas no mesmo dia, no período matutino.

Com auxílio de uma trena de 3 m x 16 mm da marca Fender Hobby® o auxiliar de processos da aciaria realizou as medições da tubulação que transporta os vapores para a atmosfera. Utilizando um termômetro digital de dois canais da marca Minipa do Brasil® modelo MT-455A, determinou-se, em escala célsius, as temperaturas da tubulação em dois pontos: uma próxima ao atomizador e outra próxima a saída do vapor para a atmosfera, bem como a temperatura do vapor na saída da tubulação. Com auxílio de um

anemômetro digital da marca Minipa do Brasil® modelo MDA-10A, ajustado para metros por segundo, mediu-se a velocidade de saída do vapor.

Para determinarmos a porcentagem de água que efetivamente transforma-se em vapor, retiramos uma amostra de 1,2 kg do “lodo” que é composto de uma mistura de pó de ferro e água, coletado na extremidade inferior do atomizador com auxílio de um balde sem graduação. Utilizou-se um o processo de filtração simples, cujo objetivo foi de separar mecanicamente as partículas sólidas de pó de ferro da mistura líquida com auxílio de um filtro de papel convencional.

3.2 Trocador de calor aletado

Para aumentar a taxa de transferência de calor entre a tubulação que transporta o vapor de água para a atmosfera e o trocador de calor que será instalado no lado externo da aciaria, utilizou-se uma superfície estendida denominada aleta. A transferência de calor, nas fronteiras da aleta, ocorre perpendicularmente a transferência de calor no interior do sólido por diferentes configurações como uma aleta plana, fixada a uma parede plana, ou anular que é fixada radialmente a circunferência externa de um cilindro, sendo a sua seção transversal variável com o raio a partir da parede da tubulação (INCROPERA; WITT, 2014, p.276-279).

O software matemático *Mathcad*® versão 14.0.0.163 foi usado para os cálculos e apresentação dos resultados numéricos com os dados coletados em campo. É um programa matemático de engenharia baseado em ambiente de álgebra computacional que permite a avaliação numérica e simbólica de expressões matemáticas, construção de gráficos, construção de algoritmos para realizar tarefas matemáticas e cálculos em geral. (SOLODOV; OCHKOV, 2005) instruem em seu livro, *Differential Models: an introduction with Mathcad*, como usar o software para o cálculo de troca térmica e fricção de fluidos em fluxos unidimensionais usando modelos matemáticos diferenciais o que possibilita o desenvolvimento de inúmeros ensaios matemáticos.

4. APRESENTAÇÃO DOS DADOS: ESTUDO DE CASO

O sistema de produção do pó de ferro no atomizador foi avaliado considerando-se a maior carga de trabalho. Como condições de contorno, assumiu-se que a saída de água, em estado líquido e gasoso, é contínua conforme a ocorrência do processo. Assim, consideramos que 170 (cento e setenta) metros cúbicos por hora de água no estado líquido entra no atomizador durante 45 minutos de processo, obtendo-se assim 1275×10^5 L de água.

Para o cálculo da massa de água que representa este volume considerou-se que a massa específica da água, ρ , a temperatura ambiente é de 1 kg/L, assim temos que a massa de água, $M_{\text{água}}$, é de 1275×10^5 kg de água.

Logo temos a massa de água, $M_{\text{água}}$, de aproximadamente 130 toneladas, considerando o valor indicativo como extremo. A etapa de filtração do “lodo”, consistiu na coleta de uma amostra contida na parte inferior do atomizador utilizando um balde não graduado. Esta amostra possuía massa de 1,2 Kg. Com um filtro de papel doméstico reteve-se o material sólido separando-o da água que ficou retido em um béquer. Obteve a massa de água nesta mistura de 0,7995 kg o que corresponde a 66,6% de água líquida ao final do processo de atomização. Portanto 33,4% da massa de água transforma-se em vapor o que corresponde a 43 Toneladas de água no tempo do processo considerado.

Uma massa considerável de vapor de água é perdida no processo de atomização para a atmosfera, portanto propõe-se aqui um protótipo viável para recuperar a água utilizando um sistema aletado acoplado a um trocador de calor.

O trocador de calor é um sistema que permite a troca de calor entre dois fluidos a diferentes temperaturas separados por uma parede sólida sendo classificados de acordo com a configuração do escoamento do fluido e do tipo de construção. Assim existem uma grande variedade de equipamentos de diferentes configurações com intuito de aumentar a taxa de transferência de calor e assim melhorar a eficiência térmica diante das necessidades do projeto. Podemos citar o trocador de calor tubular com aletas em que os fluidos a diferentes temperaturas movem-se em um escoamento cruzado (um fluido esco

perpendicularmente em relação ao outro) como ocorre nos radiadores automotivos (INCROPERA; WITT, 2014,p.1184 e 1185).

O projeto de aleta deve ser determinado pelo menor custo de material na fabricação desta com a maior efetividade na troca de calor entre o fluido e a superfície (INCROPERA; WITT, 2014,p.297).

Para determinarmos como a temperatura na aleta varia e conseqüentemente a taxa de transferência de calor, necessitamos de um conjunto de hipóteses, ou seja, condições de contorno do modelo matemático utilizado para os cálculos. Assumiremos um regime permanente, isto é, nenhuma propriedade ou grandeza foi variada com o tempo, não houve geração interna de calor nas aletas, as trocas térmicas entre o fluido e as aletas acontecerão apenas por convecção. Portanto, desprezou-se os efeitos da radiação térmica e finalmente, a condução ocorre apenas na direção do eixo cartesiano x que corresponde ao eixo adotado para orientação da aleta (Figura 3 e 4).

Figura 3 - Aleta anular

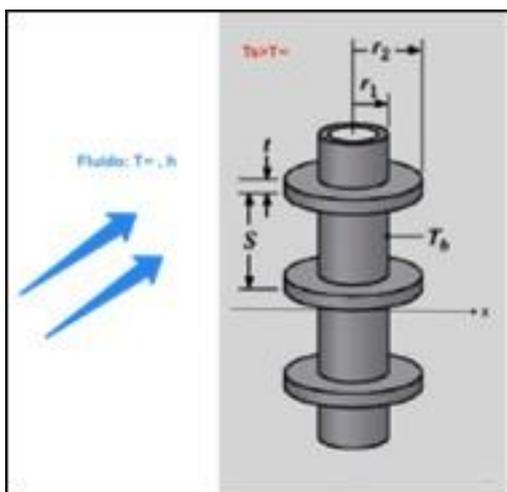
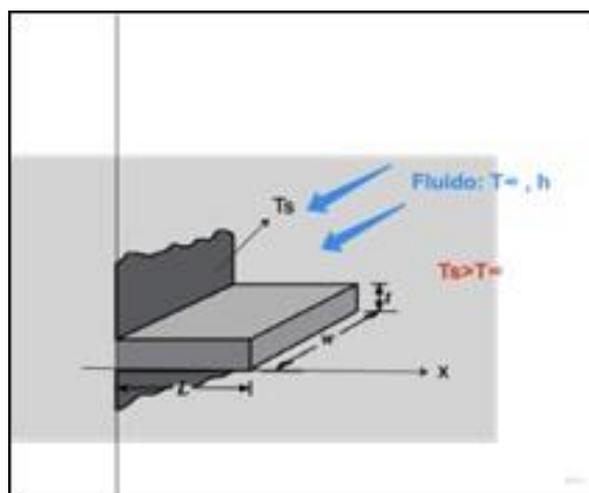


Figura 4 - Aleta retangular



Fonte: adaptado de INCROPERA; WITT, 2014

Nestes modelos, mais comumente utilizados, as aletas estão dissipando energia na forma de calor para o meio, por convecção, à medida que o gradiente de temperatura, na

aleta, diminui ao longo de seu comprimento, por condução, conforme ilustrado (Figuras 5 e 6). Logo a temperatura da superfície, T_s , é maior que a temperatura do fluido (T_∞).

Figura 5 - Perda de energia por condução e convecção na aleta anular

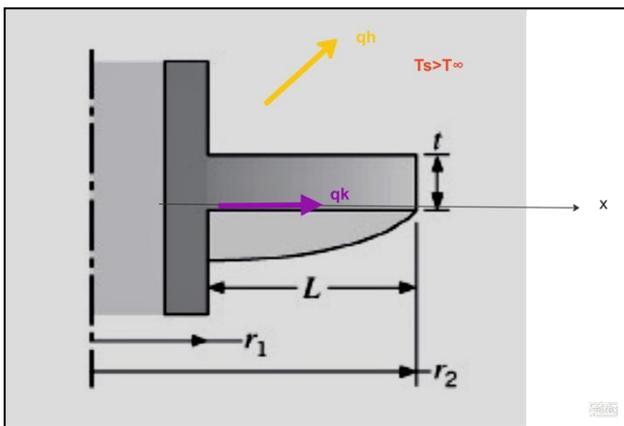
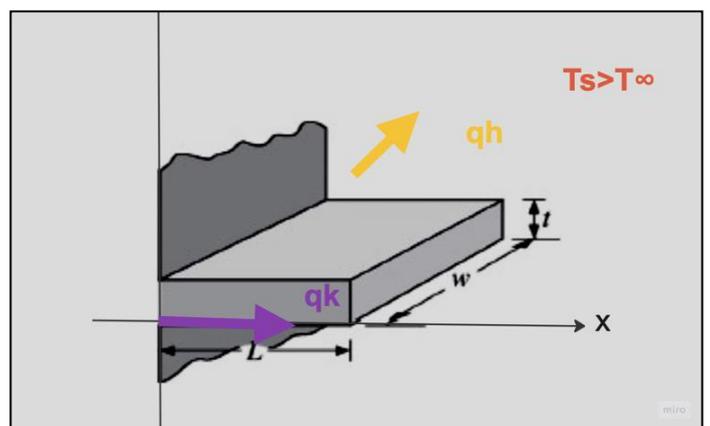


Figura 6 - Perda de energia por condução e convecção na aleta retangular



Fonte: adaptado de INCROPERA; WITT, 2014

Para o cálculo da distribuição de temperaturas ao longo da coordenada x usaremos a (Equação 5), em que T , em kelvin [K], se refere a temperatura da aleta em função da posição no eixo, T_∞ é a temperatura do fluido e m é o coeficiente da aleta.

$$(5) \quad (T - T_\infty) = C_1 \cdot e^{m \cdot x} + C_2 \cdot e^{-m \cdot x}$$

$$m^2 = \frac{h \cdot p}{k \cdot A} \text{ em } [m^{-1}]$$

h = coeficiente de calor por convecção [$W/(m^2 \cdot K)$]

k = condutividade térmica [$W/(m \cdot K)$]

p = perímetro da aleta formado pela área por condução [m]

A = área da seção transversal de transferência de calor por condução [m^2]

C_1 e C_2 são obtidos aplicando-se as condições de contorno dos casos práticos de utilização das aletas. Em uma condição em que o comprimento da aleta, L , é muito grande (aleta infinita), a temperatura da região extrema da aleta e a temperatura do fluido são

REVISTA DA FATEC GUARULHOS
Gestão, Tecnologia & Inovação
 v. 1, nº 9 (2024)
 ISSN: 2448-4458

iguais. Da (Equação 5) geramos a (Equação 6) em graus [K]. Para determinarmos a taxa de transferência de calor por esta aleta, ou seja, quanto de energia na forma de calor esta aleta dissipa e adotando-se as condições de contorno temos pela lei de Fourier em X= 0, a (Equação 7) em watt [W].

$$(6) \quad (T - T_{\infty}) = (T_s - T_{\infty}) \cdot e^{-m \cdot x}$$

$$(7) \quad q = (T_s - T_{\infty}) \cdot (h \cdot p \cdot k \cdot A)^{1/2}$$

Para encontrar a eficiência da aleta, cujo procedimento seleciona o tipo de aleta, devemos utilizar um gráfico da característica geométrica da aleta por eficiência, conforme observam-se (Figura 7 e Figura 8) (INCROPERA; WITT, 2014, p.293).

Figura 7 - Eficiência gráfica da aleta anular

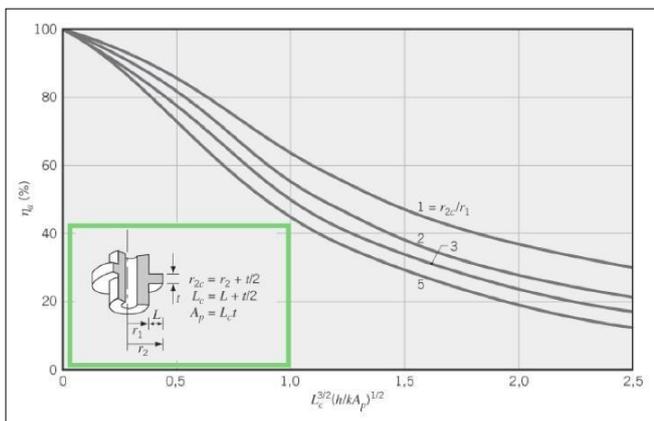
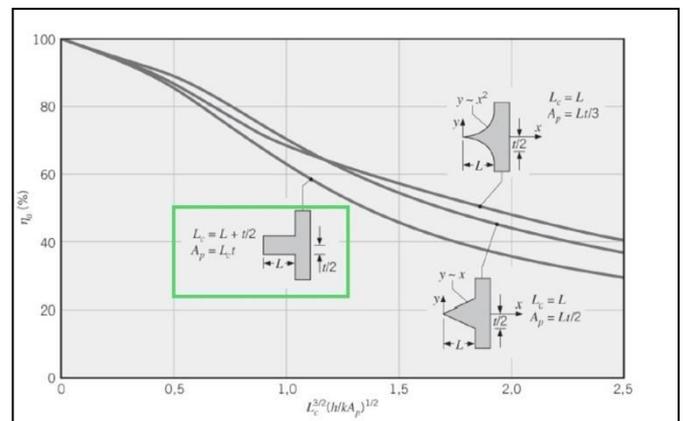


Figura 8 - Eficiência gráfica da aleta retangular



Fonte: adaptado de INCROPERA; WITT, 2014

Denominando-se as características geométricas e térmicas da aleta, eixo das abcissas, de ψ obtemos a (Equação 8) a partir da Figura 7, em calorías. Calculando o termo ψ , encontramos um ponto do eixo da abcissa. Ao traçar-se uma linha até a curva correspondente, pelo eixo da ordenada encontramos a eficiência da aleta. Seguindo a mesma diretriz, utilizando a Figura 8 como referência, obteremos a mesma equação para a aleta retangular.

A decisão em utilizar ou não um sistema aletado, requer também levar em consideração a efetividade da aleta, ϵ , definido como taxa de transferência de calor na aleta sobre a taxa de transferência de calor sem a aleta, neste caso a transferência de calor ocorreria na base da aleta. No caso de uma aleta infinita temos a Equação 9, considerando ϵ maior possível para justificar o uso de aletas:

$$(8) \quad q = (T_s - T_\infty) \cdot (h \cdot p \cdot k \cdot A)^{1/2}$$

$$(9) \quad \epsilon := \frac{k \cdot p}{h \cdot A} \quad \epsilon \geq 2$$

O calor que o vapor de água que sai da tubulação do atomizador é cedido para o ambiente, variando a sua temperatura, conforme a (Equação 10).

$$(10) \quad \text{quantidade de calor (q1)} = M \cdot c_{pm} \cdot (T_2 - T_1)$$

q1 em [J]

M em [g mol]

c_{pm} (capacidade térmica molar média dos gases) em [J/g mol.K]

T em [K]

Quando esta massa de vapor entra no trocador de calor, em contato com o sistema aletado, há uma mudança de estado físico da água que passará para o estado líquido em um processo denominado condensação, a temperatura constante dada pela (Equação 11).

$$(11) \quad \text{quantidade de calor (q2)} = m \cdot \Delta H$$

q2 em [j]

m em [g]

H (entalpia) em [kJ/kg]

Consideraremos para os cálculos que todo vapor que sai da tubulação para a atmosfera, é formado por vapor de água. A massa de vapor foi calculada em 43 toneladas. As temperaturas do vapor na saída para a atmosfera, $T_1 = 344,3 \text{ K}$, assim como a

temperatura ambiente externa a aciaria, $T_2 = 296$ K, foram medidas em dois horários distintos com o intuito de acompanhar duas bateladas do mesmo produto.

A capacidade calorificas molares dos gases é dada pela tabela 1.6-1 de GEANKOPLIS, (2003, p.18). O valor de temperatura de referência, 296 K, não se encontra tabelado. Iremos utilizar o valor de inicio da tabela, ou seja, 298K.

$$C_{pm} := 33.6 \frac{\text{J}}{\text{gmol} \cdot \text{K}}$$

Considera-se que o gramas mol (gmol) é a massa molecular tomada em gramas. Portanto o número de mols, n , de água em 43 toneladas de vapor de água, considerando a massa molar da água 18 gramas por mol temos 239×10^4 mols. Logo a quantidade de calor requerida, q_1 , para a variação de temperatura do vapor para a temperatura ambiente, utilizando a (Equação 9) é de -3.9×10^9 J.

Ao mesmo tempo existe uma transformação de fase do estado gasoso para o estado liquido do vapor de água, denominado condensação, quando o vapor atinge o sistema aletado. A temperatura constante, a variação de entalpia neste processo é igual ao calor de transformação. A quantidade de calor para que esta transformação de fase ocorra é dada pela equação (6). A variação de entalpia da tabela A.2-9 (*properties of saturatated steam and water in SI units*) de GEANKOPLIS, (2003, p.962). Interpolando linearmente os valores de entalpia, T_1 (vapor saturado) e T_2^* (água em estado liquido a temperatura ambiente) admitido como temperatura indicativa para analisar o custo energético, temos:

$$T_1 := 71.3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_2^* := 23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_1 := 2629 \frac{\text{J}}{\text{g}} \quad h_2 := 96.5 \frac{\text{J}}{\text{g}}$$

Da (Equação 10), o calor necessário para que aconteça a condensação é:

$$\Delta H := h_2 - h_1$$

$$\Delta H := -2532.5 \frac{\text{J}}{\text{g}}$$

$$q_2 := -1.1 \times 10^{11} \text{ J}$$

Portanto a quantidade de calor total para que o vapor de água se torne água no estado líquido é a somatória, Q, de q_1 e q_2 é $-1.1 \times 10^{11} \text{ J}$.

A quantidade de calor necessário para a condensação é negativa pois precisamos remover energia do sistema proveniente dos processos convectivos e condutivos.

ÇENGEL; GHAJAR, 2015 afirmam que no projeto de um trocador de calor aletado, o comprimento da aleta é um fator limitante. Quanto maior o comprimento menor a eficiência e maior o custo de fabricação devido a maior incremento de material sendo que uma eficiência abaixo de 60% deve ser rejeitada. Por outro lado, na prática, a eficiência das aletas fica aproximadamente em 90% o que corrobora para a utilização desta em projetos de transferência de calor.

Partindo de uma massa de 43 toneladas de vapor em uma batelada de quarenta e cinco minutos de processo, como mostrado nos cálculos acima, considerando um processo contínuo na indústria e uma eficiência do sistema aletado de 90% temos que a massa de água recuperada é de 39 toneladas.

Se 1 m^3 de água equivale a 1000 kg do mesmo elemento então, o volume de água recuperado de é 39 m^3 de água. Para o regime de funcionamento da unidade de dezoito horas de produção durante seis dias da semana, totalizando vinte e quatro dias de produção contínua podemos estimar monetariamente, utilizando os dados do custo de água do município de Mogi das Cruzes, segundo o decreto no 21.140 de 5 de agosto de 2022 constante no processo no 201.123/ 2022 do SEMAE (Serviço Municipal de Águas

e Esgotos de Mogi das Cruzes). A tarifa de água e esgoto para uso industrial, imposta pelo município para esta porção é de R\$ 26,16 por metro cúbico de água. Considerando o volume de água recuperada de trinta e nove metros cúbicos em uma batelada do processo, transformando o volume de água recuperado em valores monetários, considerando o regime de trabalho da empresa, chega-se ao a quantia de aproximadamente 400 mil reais, que são dissipados em forma de vapor de água para a atmosfera.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a proposta de redesenho da estrutura administrativa da empresa objeto do estudo de caso pode-se alcançar uma redução de custos e espaço físico equivalente a 30%. A mudança de regime presencial para teletrabalho gera uma redução de 61,58% dos custos com benefícios. A economia total com a alteração de modalidade de trabalho pode gerar uma economia anual de R\$ 1.079.858,88 (um milhão, setenta e nove mil, oitocentos e cinquenta e oito reais e oitenta e oito centavos) para a empresa, conforme aponta a Tabela 8.

O modelo teórico aqui apresentado para recuperação de água a partir das emissões de vapor de água, mostrou-se viável dentro das condições de processo consideradas. Deste modo, empresas técnicas especializadas poderão, a partir deste modelo, propor instrumentação adequada para isto, apresentando ainda, a viabilidade econômica de sua implantação, projeção de investimento e seu retorno, considerando-se não apenas o custo atual pelo consumo, mas também sob o ponto de vista da sustentabilidade e conservação deste recurso natural. Este modelo, portanto, pretende ser uma ferramenta para a empresa para a tomada de mais uma ação na direção da gestão sustentável de recursos.

O investimento deste valor, a curto prazo, em um processo de recuperação de água usando o modelo em questão tornaria o processo altamente sustentável. A água recuperada pode ser reaproveitada no próprio processo de atomização, no uso administrativo industrial como saneamento das áreas comuns e abastecimento de caixas

REVISTA DA FATEC GUARULHOS

Gestão, Tecnologia & Inovação

v. 1, nº 9 (2024)

ISSN: 2448-4458

d'água para uso sanitário. Quando tocamos na seara de aplicações do reaproveitamento do vapor aquecido, quando canalizado, este torna-se matéria prima para um sistema de calefação industrial para conforto ocupacional quando aplicado em países com temperaturas negativas e que usam a metalurgia do pó.

REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. Heat and mass transfer: fundamentals & applications. Fifth edition ed. New York, NY: McGraw Hill Education, 2015.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó, técnicas e produtos**. 3. ed. São Paulo: [s.n.].

FERRARO, B. B. Estudo das Propriedades Termofísicas de Escória Metalúrgica e de Escórias Sintéticas de CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO. **São Paulo**, 2014.

GAJIC, D. *et al.* Modelling of electrical energy consumption in an electric arc furnace using artificial neural networks. **Energy**, v. 108, p. 132–139, ago. 2016.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Separation Process Principles (Includes Unit Operations)**. 4th ed. ed. [s.l.] Prentice Hall, 2003.

GERMAN M., R. **Powder Metallurgy & particulate materials processing**. [s.l: s.n.].

HE, W. *et al.* Dry Granulation of Hot Metal and Heat Recovery from Off-Gas. Em: ZHANG, L. *et al.* (Eds.). **Energy Technology 2017**. The Minerals, Metals & Materials Series. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 117–122. doi: 10.1007/978-3-319-52192-3_12

HE, W. *et al.* Novel preparation process of iron powders with semisteel by rotary cup atomizer. **Powder Technology**, v. 356, p. 1087–1096, nov. 2019. doi: 10.1016/j.powtec.2019.09.009

REVISTA DA FATEC GUARULHOS
Gestão, Tecnologia & Inovação
v. 1, nº 9 (2024)
ISSN: 2448-4458

HRYHA, E.; WENDEL, J. Effect of heating rate and process atmosphere on the thermodynamics and kinetics of the sintering of pre-alloyed water-atomized powder metallurgy steels. **Journal of the American Ceramic Society**, p. jace.16079, 3 out. 2018. doi: 10.1111/jace.16079

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7º Ed ed. [s.l.] LTC, 2014.

KRUZHANOV, V. S. Modern Manufacturing of Powder-Metallurgical Products with High Density and Performance by Press–Sinter Technology. **Powder Metallurgy and Metal Ceramics**, v. 57, n. 7–8, p. 431–446, nov. 2018. doi: : 10.1007/s11106-018-0002-1

LOGAR, V.; ŠKRJANC, I. The Influence of Electric-Arc-Furnace Input Feeds on its Electrical Energy Consumption. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 7, n. 3, p. 1013–1026, set. 2021. doi: 10.1007/s40831-021-00390-y

LOPES, V. D. MELHORIA DA QUALIDADE DA SUCATA UTILIZADA EM FORNO ELÉTRICO A ARCO ATRAVÉS DA COMBINAÇÃO DE DUAS ROTAS DE PROCESSAMENTO. Fortaleza, Trabalho de conclusão de curso (Engenharia metalúrgica) - UFC, 2022.

MEDEIROS, T. C. L.; SANTOS, V. M. ANÁLISE DOS RISCOS OCUPACIONAIS EM UMA EMPRESA DE SUCATA METÁLICA. Mossoró, Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em ciência e tecnologia) - UFERSA, 2019.

SOLODOV, A.; OCHKOV, V. F. **Differential models: an introduction with Mathcad**. Berlin; New York: Springer, 2005.