

DUTOS DO DESPOEIRAMENTO REFRIGERADOS POR SPRAY

Por Troy D. Ward, P.E.
Systems Spray-Cooled Equipment Company, Nashville, TN

**Traduzido por – Lauro Chevrant
KONUS ICESA SA
DIRETOR TECNOCOMERCIAL**

INTRODUÇÃO

Dutos Refrigerados por “spray” utilizam água à pressão atmosférica. Uma vez que o sistema de refrigeração não é pressurizado, os vazamentos de grande volume de água por causa da alta pressão são eliminados. No caso de sprays, que criam turbulência as taxas de transferência de calor são otimizadas em qualquer taxa de fluxo. Um circuito de refrigeração independente fechado oferece a possibilidade de variar a capacidade de refrigeração do sistema de acordo com as exigências locais. Uma construção com paredes finas reduz o impacto de fissuras causadas por fadiga térmica induzida

A construção do corpo combinada com o circuito de refrigeração separado promove uma manutenção de baixo custo.

Este documento discute as diversas formas de Dutos Refrigerados por “spray”) e como seu projeto reduz o tempo improdutivo da fornalha ao prolongar a vida do duto.

PONTOS DE DISCUSSÃO

CARACTERÍSTICAS DE PROCESSO

CONSTRUÇÃO DO CORPO

SISTEMA DE “spray”

ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

TUBULAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO

MANUTENÇÃO E REPAROS



1. CARACTERÍSTICAS DE PROCESSO

A refrigeração por “spray” realiza a função de refrigeração à pressão atmosférica utilizando bocais “spray” para a refrigeração ao duto.

Os bocais “sprays” fornecem a quantidade necessária de água de refrigeração para as áreas de carga de calor variáveis identificadas no duto. A série de “sprays” sobrepostos cria um alto grau de turbulência a baixa pressão atmosférica. Quanto maior a turbulência, mais eficientemente o sistema será.

O coeficiente de transferência de calor para fluxo turbulento é dez vezes maior do que o coeficiente de transferência de calor para fluxo laminar.

Os benefícios da refrigeração por “spray” incluem:

- A operação à pressão atmosférica reduz a quantidade de água que vaza para o sistema interno de despoejamento há uma trinca no duto.

Um duto típico de despoejamento refrigerada por “spray” operando a 6,9 m³/hora/m² vazaria somente 11,34 l/h por hora através de uma abertura de 2 polegadas quadradas.

- Por contraste, um típico componente tubular de fornalha refrigerada a água operando a 4 bar descarregaria mais do que 72.576 l/h através de furo do mesmo tamanho.
- O uso de água de refrigeração é mantido eficiente distribuindo-a de acordo com as exigências das áreas de carga de calor variáveis identificadas ao longo do duto; menos água por pé quadrado sendo exigida em áreas mais frias e mais água por pé quadrado sendo exigida em pontos quentes. A distribuição de água de refrigeração dentro do duto é feita por meio de tubulação de aço inoxidável que não é parte da superfície aquecida. O acúmulo de resíduos na tubulação de distribuição de refrigeração a água,

o que pode afetar adversamente as taxas de transferência de calor em dutos tubulares resfriados a água, não é um fator a considerar quando se trata da refrigeração por “spray”. A água de refrigeração é distribuída ao longo do duto com a mesma temperatura da água que entra. A refrigeração se mantém constante.

- Volumes de água menores a pressões menores reduzem os custos com bombeamento. Bombear o mesmo volume de água de refrigeração à metade da pressão reduzirá os custos de bombeamento em 50%. Bombear metade do volume de água a metade da pressão reduzirá os custos de bombeamento em 75%.

Se a construção do duto é feita adequadamente, ele ficará menos suscetível a fissura térmica induzida por fadiga. A construção em chapa permite que sejam feitos reparos pelo lado de fora, ao invés de ser feita pelo lado de dentro. A operação à pressão atmosférica permite que os vazamentos sejam temporariamente reparados por meio de uma fácil técnica de solda com remendo ainda com o duto em serviço. Os reparos permanentes podem ser programados considerando as necessidades de produção. Esses benefícios resultam numa redução do tempo improdutivo do forno devido a uma melhor disponibilidade do equipamento.

2- CONSTRUÇÃO DO CORPO

Os dutos refrigerados por “spray” são tipicamente conjuntos de seções cilíndricas ou oblongas (Figura 1). A divisão em seções auxilia no controle de acúmulo de água, o que gera um efeito em cascata ao longo da duto interno pela tensão superficial.

O transporte e a instalação também são beneficiados pela abordagem por seção. Cada seção consiste de uma duto interno e uma externa.

A duto interno é a face quente e fica em contato direto com os gases quentes. A armação externa envolve a duto interno formando um invólucro anular. Em cada extremidade existe uma peça de fechamento que conecta a duto interno à armação externa. O anel entre as duas armações é a câmara de “spray”. O acesso à câmara de “spray” é através de janelas de fácil abertura que estão na armação externa. As janelas permitem a inspeção do sistema de “spray” e do duto quente. Elas ficam posicionadas estrategicamente próximas aos pontos quentes identificados.

A armação externa é o componente estrutural do duto refrigerado por “spray”. É por ela que passa a carga do duto e onde todos os apoios são fixados. A armação externa dá apoio à duto

interno prendendo-se somente nas extremidades. Uma vez que o invólucro tem ventilação e opera à pressão atmosférica, não são exigidas conexões adicionais entre as armações interna e externa. Esta construção oferece a mínima limitação de espaço à duto interno, passando por expansões e contrações térmicas cíclicas. Combinado com a espessura otimizada da chapa, que é baseada na carga de calor, este recurso serve para minimizar a fissura térmica por fadiga.

DUTO INTERNO (“INNER SHELL”)
 ARMAÇÃO EXTERNA (“OUTER SHELL”)
 CÂMARA DE “spray”
 ANEL
 PEÇA DE FECHAMENTO
 ABERTURA DE VENTILAÇÃO
 FLANGE DE SEÇÃO APARAFUSADA
 PEÇA DE FECHAMENTO



Figura 1

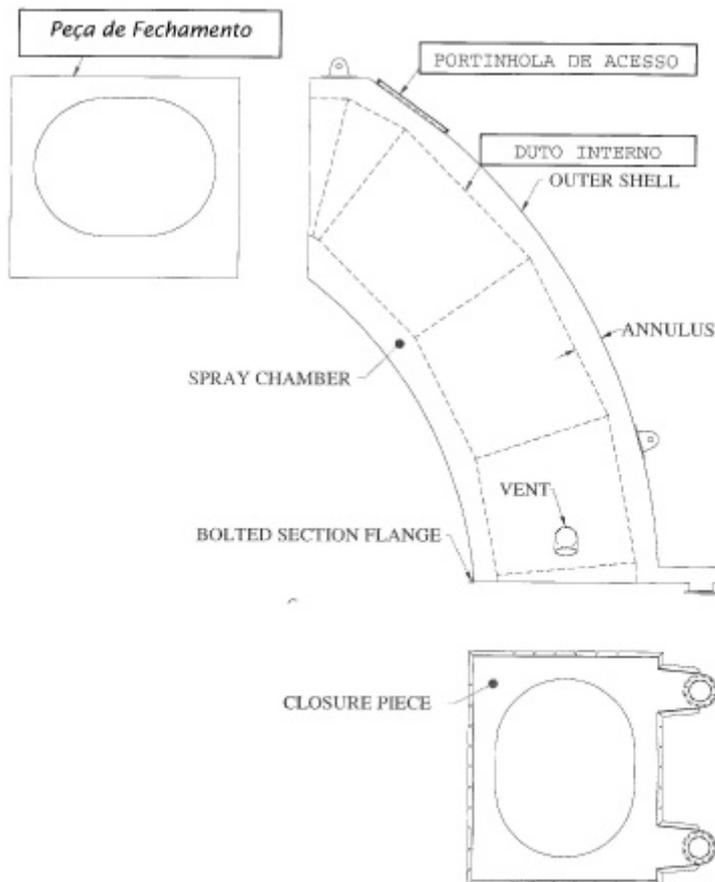


Figure 1

O material básico usado para o duto interno em equipamentos refrigerados por “spray” é a chapa de aço carbono, com qualidade para cilindro de pressão ASTM A-516 Grau 70. Propriedades como condutividade térmica, fadiga admissível, exequibilidade, e relações custo-benefício têm demonstrado que, para a maior parte das aplicações, o aço-carbono adequado para o uso em temperaturas elevadas é preferido.

A espessura da duto interno é uma função de duas considerações. Uma espessura será considerada baseada em sua eficácia em minimizar a fissura térmica por fadiga. Uma outra espessura será considerada baseada em sua eficácia em resistir à corrosão e ao desgaste. Segue uma amostra de determinação da espessura apropriada do material considerado de carga de calor e fadiga térmico:

INFORMAÇÃO DADA:

- Taxa de fluxo da água de refrigeração no duto existente = 681 m³/h
- Temperatura da água no interior = 80 F = 27° C
- Temperatura da água no exterior = 160 F = 71° C
- -Área da superfície = 61,7 m²
- Coeficiente de Expansão Térmica da Chapa = 6.33×10^{-6} pol./ pol. x F
- Módulo de Elasticidade da Chapa = 30×10^6 lb / pol.²
- Raio da Chapa Poisson's = 0.303
- Condutividade Térmica da Chapa = 25 Btu/hr x ft x F

ANÁLISE:

$$\text{Transf. de Calor} = \frac{\text{Vazão de água} \times \text{Calor Específico} \times \text{Delta de Temp.}}{\text{Área}}$$

$$\text{Temp. Diferencial da Chapa} = \frac{\text{Fluxo de Calor} \times \text{Espessura da Chapa}}{\text{Condutividade Térmica da Chapa}}$$

$$\text{Tensão} = \frac{\text{Coef. de Exp. Térm. da Ch.} \times \text{Mód. de Elast. da Ch.} \times \text{Temp. Dif. da Chapa}}{2 \times (1 - \text{Mód. de Poisson})}$$

Combinando as duas últimas equações chegamos à seguinte relação:

$$\text{Tensão} = \frac{\text{Coef. de exp. Térm.} \times \text{Mód. de elast.} \times \text{Transf. de calor} \times \text{Esp. da chapa}}{2 \times (1 - \text{Mód. de Poisson}) \times \text{Condutividade térmica da chapa}}$$

Transferência de calor:

$$\text{Transf. de calor} = \frac{3000 \text{ gal/min} \times 8.33 \text{ lb/gal} \times 60 \text{ min/hr} \times 1 \text{ Btu/lb} \times 80^\circ\text{F}}{617 \text{ ft}^2}$$

Transf. de calor = 194.490 Btu / hr x ft² (613 kW/m²)

Tensão: P/ chapa 1/2”:

$$\text{Tensão} = \frac{6.33 \times 10^{-6} \text{ pol./pol.} \times 30 \times 10^6 \text{ lb/pol}^2 \times 194,490 \text{ Btu/hr} \times \text{ft}^2 \times 0.50/12 \text{ ft}}{2 \times (1-0.303) \times 25 \text{ Btu/hr} \times \text{ft} \times 30^\circ\text{F}}$$

Stress = 44.158 lb/pol² (3.104 kg/cm²)

Tensão: p/ chapa 3/8”:

$$\text{Tensão} = \frac{6.33 \times 10^{-6} \text{ pol./pol.} \times 30 \times 10^6 \text{ lb/pol}^2 \times 194,490 \text{ Btu/hr} \times \text{ft}^2 \times 0.375/12 \text{ ft}}{2 \times (1-0.303) \times 25 \text{ Btu/hr} \times \text{ft} \times 30^\circ\text{F}}$$

Stress = 33.118 lb/pol² (2.328 kg/cm²)

Stress: p/ chapa 1/4”:

$$\text{Tensão} = \frac{6.33 \times 10^{-6} \text{ pol./pol.} \times 30 \times 10^6 \text{ lb/pol}^2 \times 194,490 \text{ Btu/hr} \times \text{ft}^2 \times 0.25/12 \text{ ft}}{2 \times (1-0.303) \times 25 \text{ Btu/hr} \times \text{ft} \times 30^\circ\text{F}}$$

Fadiga = Stress = 22.079 lb/pol² (1.552 kg/cm²)

FADIGA:

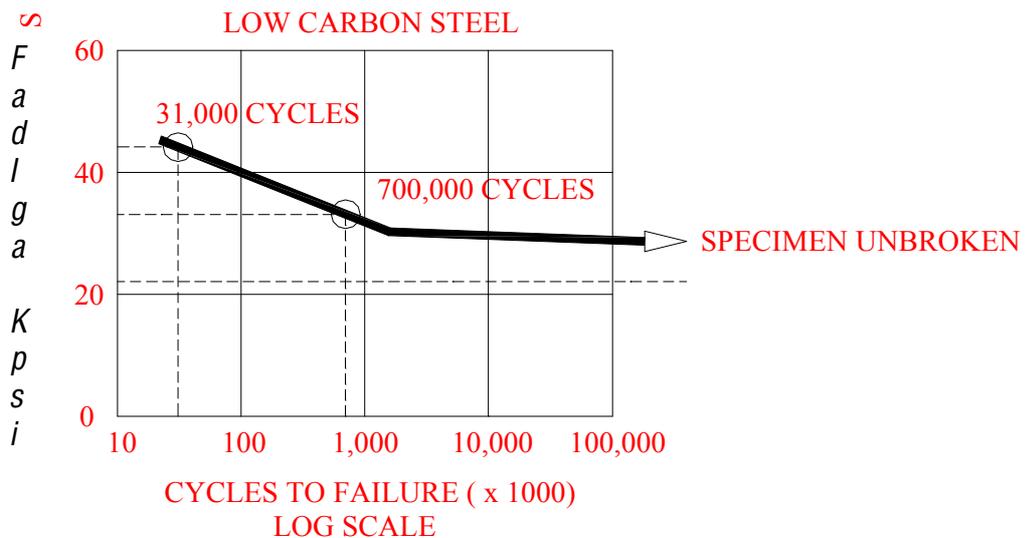


Figure 2

Da figura 2, os ciclos para falha para a amostra com um duto interno com 12,5 mm de espessura são aproximadamente 31,000. Os ciclos para falha para a amostra com um duto interno de 9,5 mm de espessura são aproximadamente 700,000.

Um duto interno com 6,35 mm de espessura teria uma vida de fadiga que excederia a 100 milhões de ciclos. Se apenas baseado na expectativa de vida com fadiga, a espessura apropriada para o duto interno de aço carbono seria de 6,35 mm.

Tipicamente, os cursos de gás em dutos são direcionados através de curvas relativamente fortes no sentido do equipamento de controle de emissões.

Exigir altas taxas de vazão aumentará a quantidade de partículas no fluxo de gás. Estas partículas dão início a erosão que é intensificada pelas fortes mudanças direcionais no fluxo do gás e pela topografia dos dutos tubulares comuns refrigeradas a água.

Levando isso em consideração, a corrosão causada pelo depósito de componentes existentes no fluxo do gás (acúmulo de ácido sulfúrico diluído em partículas de escória ou concentrações de ácido hidrocloreídrico retidas) pode resultar na formação de uma película oxidada. A

oxidação, e a constante formação e remoção de películas oxidadas pela erosão pode acelerar a remoção do metal ou o desgaste da superfície exposta. Este processo pode ter um efeito negativo sobre a fadiga do duto pois esta agressão químico/física pode acelerar a propagação de fissuras e reduzir efetivamente o número de ciclos à falha por fadiga.

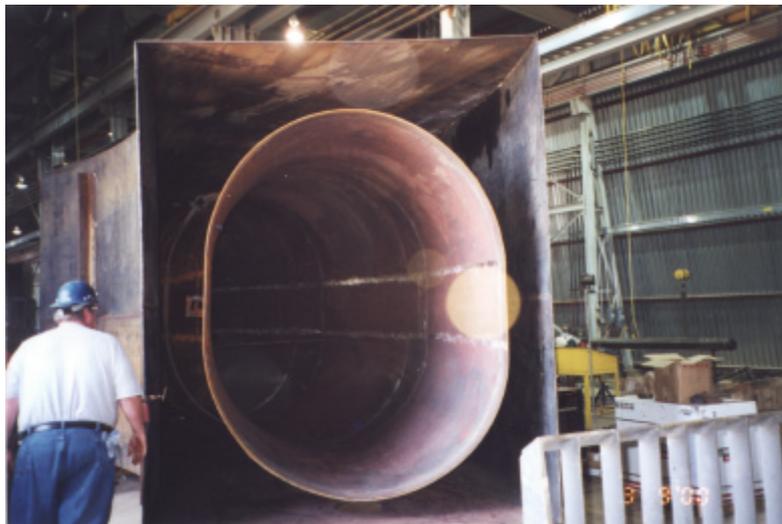
Exceto quanto às mudanças direcionais nas juntas usadas na construção do duto interno do duto refrigerado por “spray”, a superfície exposta do duto refrigerado por “spray” é regular e apresenta livre passagem do fluxo de gás. As costuras de solda da junta em são alisadas com esmeril na superfície exposta e não deixam fendas para o acúmulo de corrosão que venha causar aos componentes de fluxo de gás.

Entretanto, se corrosão ou desgaste por erosão forem identificados como o motivo da falha, a vida pode ser estendida proporcionalmente a um aumento na espessura da chapa.

Dobrar a espessura da duto interno dobraria a expectativa de vida útil. A espessura da armação entretanto, deve ser otimizada para uso considerando uma expectativa de aceitável de vida útil.

A fadiga e desgaste estão compreendidas no duto refrigerado por “spray” com a escolha apropriada da espessura da chapa do duto interno. O projeto da armação também deve levar em consideração os efeitos nos cantos soldados. Os cantos apresentam um ponto de alto potencial para fissura térmica por fadiga. Deve-se permitir que eles se expandam e contraíam livremente sem ser impedidos por sua geometria ou pelas soldas vizinhas, reforços ou anexos. O uso de chanfro é um meio eficaz de minimizar a concentração de fadiga nos cantos.

A construção e montagem de chapa conforme as instruções são partes de uma receita bem-sucedida para a manutenção bem aproveitada que prolonga a vida do duto.



3 - SISTEMA DE “spray”

O sistema de “spray” (figura 3) é uma disposição de tubulação e bocais não-corrosivos. Os bocais de “spray” são tipicamente removíveis por meio de barras destacáveis de “spray” que se conectam com um tubo de alimentação que é a fonte de água. Uma entrada simples alimenta este tubo de alimentação. A rede de tubulação inteira fica fixa à armação externa para que a duto interno possa ser substituída sem afetar o sistema de “spray”.

A quantidade de água distribuída numa área particular do duto é determinada pelo tamanho do bocal usado, a quantidade de bocais e a pressão com que a água entra. A resultante distribuição da água (gpm/ft²) e a eficácia e confiabilidade do sistema.

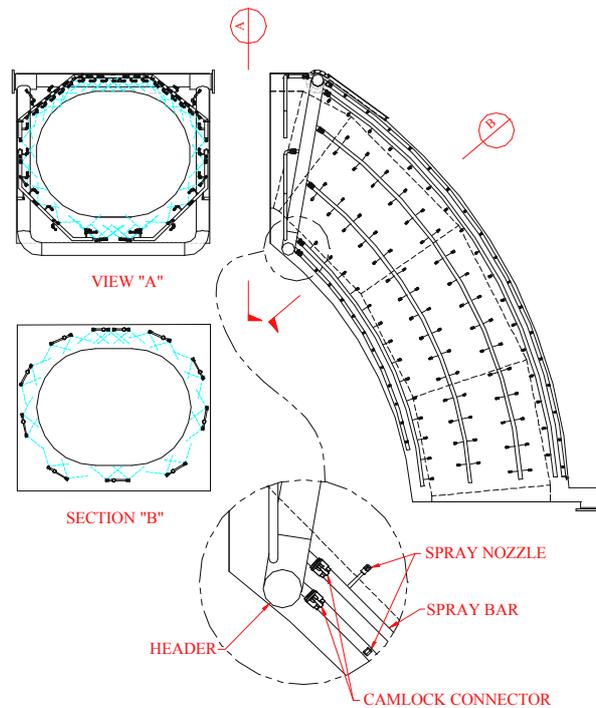
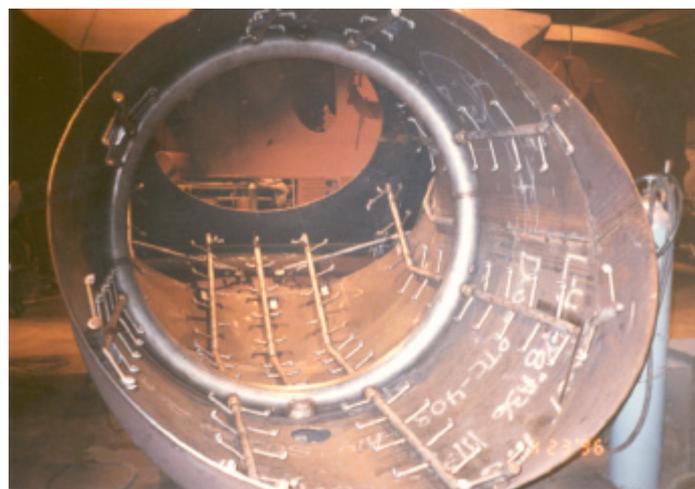


Figure 3



A incidência de gotejamento produzida pelos bocais de “spray” ao invés da típica velocidade da água para refrigeração tubular gera a turbulência necessária para a transferência de calor

otimizada. A transferência de calor bem eficaz é então obtida a virtualmente qualquer taxa de fluxo. A água de refrigeração é distribuída de acordo com as variáveis demandas de carga de calor identificadas no duto; pontos frios com menos água, pontos quentes com mais água. A água disponível é usada mais eficientemente.

A capacidade de refrigeração também pode ser facilmente aumentada. Os conectores facilitam a retirada da barra de “spray”. Seja substituindo os bocais existentes por outros com maior capacidade ou acrescentando mais bocais resultará na entrada de mais água e a respectiva refrigeração.

Os bocais de “spray” estão disponíveis numa variedade de capacidades e ângulos de “spray”. Os bocais mais comumente empregados em equipamento refrigerado por “spray” hoje em dia variam em capacidade entre 12 e 32 l/min por bocal a 2 bar e têm um cone padrão 110° padrão cone cheio.

O ângulo do “spray” do bocal, a capacidade do bocal e a distância entre o bocal e a superfície refrigerada pelo “spray” determinam a taxa de fluxo da água de refrigeração por unidade de área ($L/min/m^2$) e a cobertura-overlapping. A figura 4 mostra o efeito da distância entre o bocal e a superfície refrigerada por “spray”.

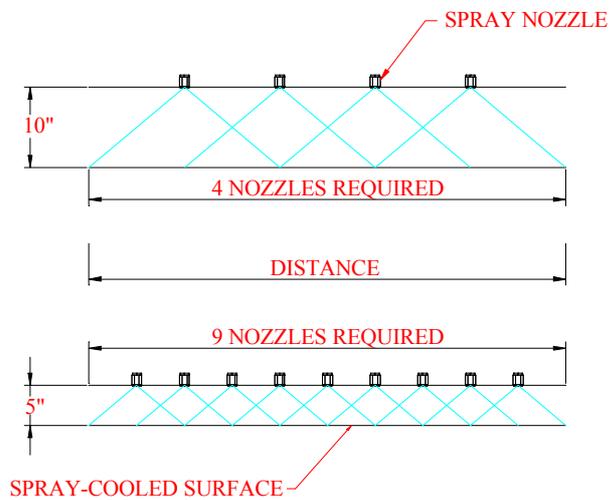


Figure 4



3- ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

As cargas de calor determinam quanto de água de refrigeração é necessária para o equipamento refrigerado por “spray”. A quantidade de água necessária é inversamente proporcional ao delta T entre a sua entrada e saída da seção para uma carga de calor identificada. Para elevar a temperatura da água quando está mais baixa exige o uso de maior quantidade de água de refrigeração.



a

Para elevar a temperatura da água quando está mais alta permite o uso de menor quantidade de água de refrigeração.

Há entretanto, uma limitação que também deve ser observada. A água de refrigeração deve ser fornecida a uma taxa que seja suficiente para minimizar a ebulição da película. A refrigeração evaporativa é indesejável. A ebulição começa à medida que água sobre a superfície aquecida é levemente superaquecida, e subseqüentemente evapora. Bolhas começam a se formar sobre a superfície durante a ebulição nucleada. À medida que a temperatura continua a subir, rapidamente formando bolhas a superfície aquecida é encoberta evitando o reabastecimento com novo líquido. Uma película de vapor, que cobre a superfície, se forma enquanto as bolhas se aglutinam.

O calor deve então ser conduzido por meio da película antes que ele possa novamente ser exposto à água de refrigeração. Esta resistência térmica causa uma redução na transferência de calor, e as condições se tornam muito instáveis.

A ebulição da película ocorre. A superfície deve dissipar o fluxo de calor que foi aplicado, caso contrário sua temperatura subirá catastroficamente acima da temperatura de fusão do metal. Por causa disso, as temperaturas de saída são limitadas em cerca de 71 °C garantindo que água de refrigeração suficiente esteja disponível para o fluxo de calor normal e oferecendo uma margem ampla para acomodar as cargas de calor transitórias. A superposição dos jatos dos de “spray” dá proteção adicional contra este fenômeno.

Se de alguma forma o bocal se encontrar entupido, os bocais adjacentes oferecerão auxílio no resfriamento da área afetada.

A água cumulativa que escorre forma uma cascata que se fixa ao duto interno por tensão superficial e flui ao longo da armação para ajudar no processo de refrigeração, oferecendo reserva à capacidade de refrigeração.

4- QUALIDADE DA ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO

As necessidades de qualidade da água são comparáveis às da água usada em outros equipamentos refrigerados por água dentro da planta. Manter baixa a temperatura da água e distribuí-la por tubulação não-corrosiva diminui as necessidades de qualidade da água.

A água ideal deve ter as seguintes características:

com um Ph que varie de neutro a levemente alcalina (7 a 8), tenha um fator de **Resistência Total** que não é maior do que 200 ppm, tenha um fator de **Alcalinidade** que não é maior do que 150 ppm, tenha um fator de **Sólidos Dissolvidos Totais** que não é maior do que 400 ppm, tenha **o maior tamanho de partículas** que não é maior do que 0.030 pol. e a uma **Temperatura** que não é maior do que 11°F é a ideal.

Funcionando apropriadamente, os bocais de “spray” são um fator-chave na operação bem-sucedida do equipamento refrigerado por “spray”. O entupimento do bocal é minimizado pela instalação de um filtro mecânico através do qual toda a água de refrigeração deve passar a caminho da entrada do duto. Um filtro cuja tela tenha abertura de no máximo 1/32 pol. é recomendável.

5-TUBULAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA

A água do “spray” é conduzida por tubulações de aço inoxidável conforme simplificado na Figura 5. Cada seção tem uma entrada com sua respectiva válvula de controle de fluxo. Um filtro comum a todas seções, fica instalado nas proximidades do duto. A tubulação de aço inoxidável garante contra contaminação por ferrugem.

Um dispositivo de medição de fluxo localizado entre o filtro e a seção é usado para monitorar as condições de baixo e de alto fluxos. Sensores de temperatura localizados na saída de descarga de cada seção monitoram a temperatura da água sendo descarregada. Os monitores de fluxo e de temperatura ficam conectados a um painel de alarme ou PLC.

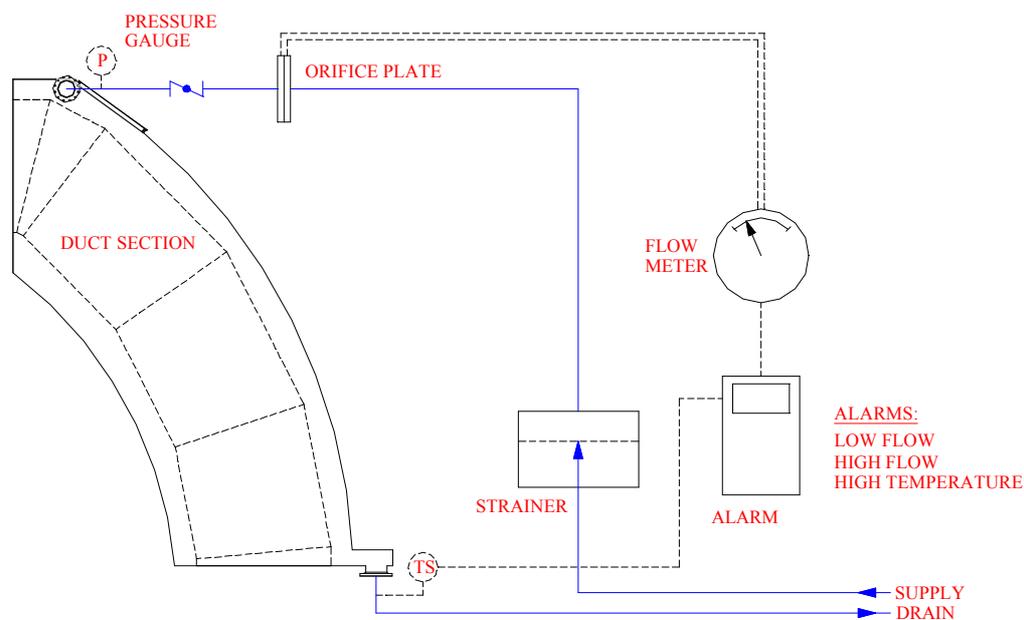


Figure 5

6-VISTORIA

A manutenção diária não é necessária. A vistoria periódica deverá ser realizada para garantir a operação apropriada do sistema de refrigeração. Basta uma vistoria visual da câmara de “spray” e a verificação de que o equipamento de monitoramento de fluxo e de temperatura está funcionando apropriadamente.

A vistoria visual da câmara de “spray” é feita quando o fluxo de água de refrigeração possa ser reduzido. A visibilidade é aumentada à medida que a taxa de fluxo reduz. Uma vistoria confirmará se os padrões de “spray” estão uniformes e sem sinais de entupimento e se a condição da duto interno está normal. Novos modelos de “spray”, que têm menor tendência a entupir, têm menos necessidade de inspeção nos padrões de “spray”.

7- REPAROS

No caso de uma furo no duto interno, o volume de vazamento de água seria mínimo. Por causa disso, a maioria dos reparos em armações internas podem ser programados para ser feitos durante uma parada programada.

Os consertos podem ser feitos pelo lado externo do duto. Reparos temporários que envolvam a soldagem de uma fissura ou a instalação de um remendo sobre um furo são uma vantagem inerente da refrigeração por “spray” e são recomendáveis para manter as operações até um desligamento programado. O duto interno é acessível ao se cortar e abrir a armação externa.

Reparos permanentes podem ser feitos em um dia sem atividades quando o tempo permitir a remoção e recolocação na área danificada. Deve-se tomar mais cuidado para que o remendo seja preparado com material da mesma espessura e grau do aço recomendado para um reparo permanente em chapa quente. A chapa do remendo será instalada rente à chapa já existente com ambas as bordas da chapa nova e da preexistente preparadas para uma solda com penetração e acabamento totais.

Os dutos refrigerados por “spray” são projetados para durar. O duto interno eventualmente se desgasta mas pode ser substituído. Uma vez que não há outra conexão entre a armação externa ou o sistema de “spray” com a carcaça interna além dos terminais de conexões, a substituição é rápida e não é de custo alto. Separa-se o duto interno de forma simples ao remover a solda nas extremidades da peça de fechamento. Quando estiver livre, a duto interno usado deslizará para fora e a nova peça deslizará para dentro e será soldada às extremidades da peça de fechamento. A armação externa e o sistema de “spray”, dentro do desgaste e consumo normais, deverão durar por tempo indefinido.

8-CONCLUSÃO

Um duto refrigerado por “spray” tem características inerentes que minimizam muitos dos problemas típicos em dutos tubulares pressurizados. Como anteriormente discutido, a pressão alta, grandes volumes de vazamentos de água, fissuras causadas por fadiga térmica induzida de manuseio e manutenção difíceis e/ou de alto custo são algumas das áreas onde a refrigeração por “spray” oferece melhorias consideráveis.

Em resumo, as vantagens básicas da refrigeração por “spray” em contraste com a refrigeração pressurizada convencional são:

- a eliminação da fonte de alta pressão, dos grandes volumes de vazamentos de água;
- a capacidade de efetivamente transferir calor a taxas baixas de vazão;

- a consistência e a uniformidade com que a água de refrigeração é distribuída;
- a facilidade com que a distribuição dessa água pode ser compatibilizada com as necessidades do duto;
- a construção que reduz o impacto das fissuras causadas por fadiga térmica induzida;
- e um conjunto completo que permite uma manutenção com prolongamento da vida útil.

Esta discussão descreveu as características da refrigeração por “spray” que prolonga a vida do duto fixo. Estes e outros benefícios podem ser substanciados ao longo de anos de desempenho bom e consistente na produção de aço em fornalhas por arco elétrico, descarbonização com oxigênio básico e argônio-oxigênio.

A Tecnologia de Sistemas Refrigerados por “spray” está coberta por uma ou mais patentes GE Patente nos Estados Unidos de Nos. 4,715,042; 4,813,055; 4,815,096; 4,849,987; 5,115,194; 5,330,161; 5,327,453; 5,444,734; 5,561,685; 5,648,981 e por patentes estrangeiras.

Systems **Spray**-Cooled Equipment Company, 311 Plus Park Boulevard, Suite 280, Nashville, Tennessee 37217, (615) 366-7772, website: <http://www.thesystemsgroup.biz>

REFERÊNCIAS:

Avallone, E. A., and Theodore Baumeister III: *Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers, 10th edition, McGraw-Hill Book Company 1996, page 5 – 9, figure 5.1.17.*

Lehr, D. A.: *Features of UCAR. Spray Cooling That Prolong BOF Hood Life, UCAR Carbon Company, Inc.*

Holman, J. P.: *Transferência de calor, 5th edition, McGraw-Hill Book Company 1981.*