

AUMENTO DA UTILIZAÇÃO DO CURSO DO PISTÃO DO GASÔMETRO DE GÁS DE ACIARIA EM FUNÇÃO DE PROBLEMAS DECORRENTES DO COMISSIONAMENTO A QUENTE¹

Alencar Soares²
Carlos Roberto da Silva³
David Arthur Swan⁴
Marcus Vinicius Buarque⁵

Resumo

Este trabalho tem como objetivo descrever o estudo feito e as ações tomadas para estabilizar a operação e aumentar a utilização do curso do pistão do gasômetro tipo Wiggins de gás de aciaria (BOF) da TK CSA. Foram levados em consideração no estudo a fundação do gasômetro, a geometria do seu casco e do pistão, a posição e o alinhamento dos contrapesos, seus cabos e cavaletes e o comprimento, diâmetro e demais propriedades da sua membrana mais a inclinação do pistão e seu afastamento do casco do gasômetro. Sendo que, no decorrer do estudo, a ênfase passou a ser na geometria dos elementos estruturais e do seu efeito na capacidade da membrana de compensar as anomalias.

Palavras-chave: Inclinação; Afastamento; Pop; Membrana.

INCREASE IN THE USE OF THE PISTON STROKE OF THE BASIC OXYGEN FURNACE (BOF) GAS GASHOLDER AS A RESULT OF PROBLEMS DUE TO HOT COMMISSIONING

Abstract

The aim of this paper is to describe the study carried out and the actions undertaken to stabilize the operation, and increase the useful piston stroke, of the Wiggins type BOF gasholder at TK CSA. The gasholder foundation, the shell and piston geometry, the position and aligning of the counter weights, their cables and support structure and the length, diameter and other physical properties of the membrane plus the piston tilt and clearance from the gasholder shell were all taken into consideration. Being that, as the study developed, the emphasis came to lie on the geometry of the structural elements and their effect on the capacity of the seal to compensate their anomalies.

Key words: Tilt; Clearance; Pop; Seal.

¹ Contribuição técnica ao 34º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 28º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 28 a 30 de agosto de 2013, Vitória, ES.

² Engenheiro Mecânico. Engenheiro Especialista da Gerência de Utilidades. ThyssenKrupp CSA. Rio de Janeiro, RJ

³ Engenheiro Mecânico. Engenheiro Especialista da Gerência de Utilidades. ThyssenKrupp CSA. Rio de Janeiro, RJ

⁴ Engenheiro Civil. Coordenador da Gerência de Engenharia de Planta, ThyssenKrupp CSA. Rio de Janeiro, RJ

⁵ Engenheiro Mecânico. Coordenador da Gerência de Utilidades. ThyssenKrupp CSA. Rio de Janeiro, RJ

1 INTRODUÇÃO

A TK CSA é uma planta integrada em que os gases provenientes do Alto Forno e da Aciaria, assim como o vapor da Coqueria são direcionados para uma termelétrica dentro da siderúrgica para serem usados na geração de eletricidade. Assim, a TK CSA é autossustentável e ainda contribui para a rede nacional. Para controlar o fluxo de gases, dois gasômetros do tipo Wiggins foram construídos. Um para receber gás do Alto Forno (BF) e o outro, gás da Aciaria (BOF). Ambos têm capacidade projetada para 100.000m³ de gás, fazendo com que fossem, ao serem entregues, os maiores gasômetros do tipo Wiggins jamais construídos (hoje há mais dois; Alchevsk na Ucrânia - BF a 130 mBar e Bhushan na Índia - BF a 120 mBar).

Entretanto, o gasômetro BOF da TK CSA é o único do seu tamanho no mundo que opera com BOF gás em baixa pressão (17 mBar), alta velocidade e com alta frequência de uso operacional e desde que foi colocado em operação tem apresentado comportamento instável em duas fases distintas. Na primeira fase foram registradas inclinações excessivas do pistão sucessivamente maiores culminando com o choque do pistão contra o casco e o mesmo ficando engastado contra as paredes. Na tentativa de resgate do pistão a membrana foi danificada provocando uma queda abrupta de pressão e subsequente queda do pistão até o chão. A membrana foi destruída e precisava ser substituída por outra da mesma fabricante. Na segunda fase, com a nova membrana e com maior número de observações e dados registrados, revelou-se que o pistão, lentamente, se deslocava do centro do gasômetro, se aproximando em direção ao casco. A aproximação é exponencial e foi estabelecido um afastamento mínimo seguro que, após ser atingido, exigia que o gasômetro fosse tirado de operação para que a membrana pudesse ser 'popeada' novamente.

2 'POPEAR' O GASÔMETRO

Há três tipos principais de gasômetro usados na siderurgia: Krone, Mann e Wiggins. Tanto o tipo Krone quanto o Mann utilizam um pistão centralizado por guias mecânicas pressionadas contra as paredes do casco e exigem estruturas pesadas, construção de alta precisão e elevada manutenção. Os gasômetros tipo Wiggins foram inventados nos anos 50 e o pistão é fixado à uma membrana de borracha conectada ao casco. O pistão se mantém centralizado pela membrana pressurizada. Os gasômetros tipo Krone e Mann vêm sendo substituídos por gasômetros Wiggins devido às suas vantagens financeiras e operacionais e o desenvolvimento de tecnologia que permite a fabricação de membranas cada vez maiores. Gasômetros de alta pressão (Gás BF de 120 a 130 mBar) e grande volume (> 70.000m³) só podem ser do tipo Wiggins. Entretanto, é possível construir gasômetros muito grandes para gás de baixa pressão (há exemplos de até 300.000m³) do tipo Mann enquanto o maior gasômetro tipo Wiggins para baixa pressão é o de 100.000m³ da TK CSA.

Independente da pressão operacional do gasômetro Wiggins, a membrana só funciona corretamente se estiver completamente esticada ou 'popeada' (da terminologia inglesa oriunda do barulho que a membrana faz ao se esticar - 'pop', na fonética inglesa). Por ser flexível, a membrana compensa eventuais anomalias na geometria da estrutura mais leve possível nos gasômetros tipo Wiggins. Estas anomalias podem ser

causadas, entre outros motivos, por vento, diferenças de temperatura e tolerâncias de construção.

Devido à queda do pistão do Gasômetro do BOF, a TK CSA considerou necessário realizar um estudo de análise de causa raiz para poder determinar possíveis estratégias de melhorias.

3 ANÁLISE DE CAUSA RAIZ DE FALHA

A TK CSA contratou a Consultora Americana Fluor que aplicou a metodologia “5 Why” no qual é aplicado a ferramenta da Árvore de Decisão para Análise Geral. A análise é baseada em Indicadores de Condições e possíveis Fatores Humanos e Falhas Mecânicas. No caso o gasômetro foi dividido em seus quatro componentes principais (fundação, casco, pistão e membrana) e a metodologia aplicada a cada um. Após análise da documentação disponível e entrevistas com integrantes das equipes de operação, manutenção, construção e da projetista, a conclusão era de que:

Segundo Frascarelli e Grande:⁽¹⁾

“A verticalidade do casco, as deformações do casco, as posições dos cabos no sistema de nivelamento do teto e os associados afastamentos entre os não simétricos casco e pistão não permitem os gasômetros de BOF e BF operarem conforme projetados...” e que isto provoca falhas secundárias, tais como: “falha da membrana, inclinação do pistão fora da tolerância operacional, e deslocamento lateral do pistão”.

O relatório de causa raiz salientou que seria necessário realizar levantamentos topográficos para validar suas conclusões.

4 LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS

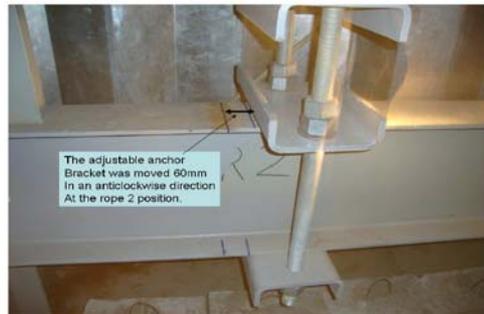
Os levantamentos topográficos foram feitos em quatro etapas.

4.1 Fundações

O nivelamento da superfície da fundação é importante no momento de início da construção do casco. Diferenças de níveis locais, ondulações na superfície na região da circunferência da base do casco e desnivelamento do bloco da fundação podem afetar a segurança da construção do gasômetro e provocar na estrutura do casco de chapas finas, regiões de concentração de estresses com subseqüentes deformações do casco. Portanto, é necessário checar a superfície do bloco da fundação antes de liberar a construção do casco metálico, acompanhar o recalque do bloco durante a sua construção, inclusive após o término da construção até que o recalque seja completo. O acompanhamento topográfico foi feito com precisão milimétrica do início ao fim das atividades. A conclusão das empresas especialistas contratadas é de que as deformações no casco do gasômetro não foram provocadas pela fundação ou do seu recalque.

4.2 Cabos e Contrapesos

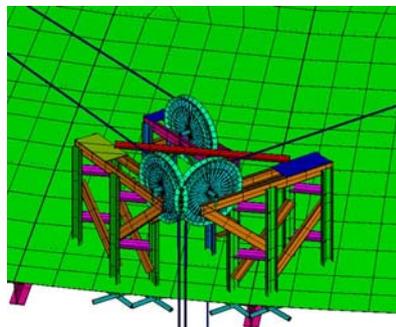
Os cabos, seus pontos de fixação, a localização da sua passagem pelo teto do gasômetro, a posição dos cavaletes e a verticalidade dos mesmos e também o prumo dos cabos e dos contrapesos foram checados. Após analisar estes levantamentos, foi necessário reposicionar os pontos de fixação dos cabos no pistão, relocar os furos na passarela de acesso no topo do pistão e também os furos de passagem pelo teto, bem como realinhar, aprumar e reforçar os cavaletes no teto que encaminham os cabos para os contra pesos.



Fonte: Fluor

Figura 1 Reposicionamento das Fixações de Cabos no Pistão

Estas simples medidas garantiram a verticalidade dos cabos presos ao pistão e aprumaram o sistema de cabos. Antes de realizar estas medidas era necessário parar o gasômetro semanalmente para 're-popear' a membrana. Após aprumar os cabos, o gasômetro ficou em operação estável até 63% do curso do pistão/capacidade por volume.



Fonte: PDL

Figura 2 Cavaletes Para Contrapesos



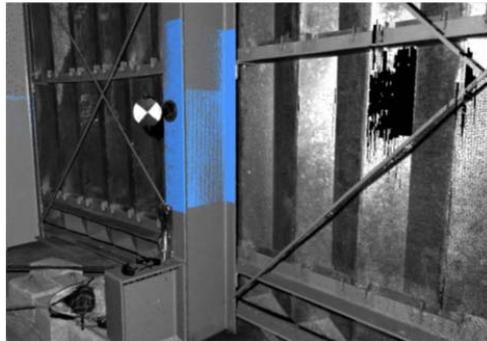
Fonte:TK CSA

Figura 3 Cavaletes Reforçados

4.3 Casco (Levantamento em 3D por Laser)

Para poder mapear a verticalidade do casco e as suas deformações foi necessário realizar levantamentos usando um equipamento de laser que faz medições em três dimensões. Os aparelhos de levantamento topográfico em 3D giram por 360° tirando milhares de leituras por minuto, criando uma nuvem de pontos dentro do raio de visão de um domo tipo 'cabeça de cogumelo' que, após processamento, gera uma imagem fiel da estrutura mapeada através da interpolação entre a malha de pontos que compõe a nuvem.

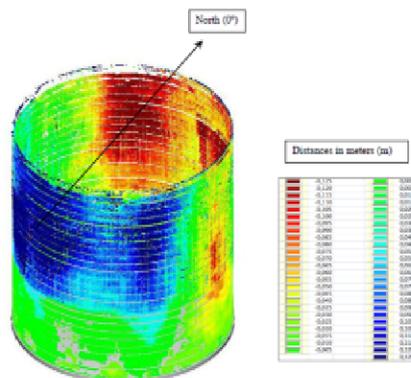
Os levantamentos em 3D foram feitos três vezes e depois superimpostos para reduzir ao máximo as imprecisões por procedimento, condições climáticas e processamento. Quanto maior a distância do ponto de origem das leituras (o aparelho), maior será o espaço entre os pontos da malha e maior a quantidade de interpolações a serem feitas pelo programa de processamento. Como as leituras são feitas num intervalo de tempo (até 30 minutos) e as estruturas metálicas não são estáticas (movimentam-se por causa de ventos e diferenças de temperatura) foi determinado, depois do primeiro levantamento, realizar os levantamentos somente à noite. Os pontos produzidos pela nuvem do aparelho de laser em 3D são "amarrados" a uma malha de pontos pré-determinados e identificados por miras fixadas em posições estratégicas.



Fonte: Fluor

Figura 5 Imagen gerada pela `Nuvem de Pontos`

Figura 5, não é uma fotografia. Ela é a imagem gerada pelo levantamento em 3D e é possível usar o arquivo que gerou a imagem para medições com precisão milimétrica em qualquer ponto visível. Pode ver, quase no centro da figura, uma das miras usadas na calibração da nuvem de pontos. Esta malha de miras é locada por aparelhos topográficos comuns de precisão sub-milimétrica. Como estes pontos (as miras) são comuns aos dois métodos de levantamento, os mais precisos são usados para calibrar e validar o resultado (pontos medidos e interpolados) do levantamento por laser em 3D.



Fonte: Fluor
Figura 6 Deformações do Casco

4.4 Pistão (Levantamento em 3D por Laser)

Da mesma forma que o casco foi submetido ao levantamento por laser em 3D, o pistão também foi mapeado. O resultado do mapeamento do pistão também mostrou deformações além das tolerâncias projetadas.

O mapeamento da geometria das paredes do casco, seu teto e do pistão através de levantamentos topográficos usando tecnologia de ponta e de alta precisão validou a Análise de Causa Raiz, comprovando que a geometria do casco, pistão, a integração entre os dois (o afastamento entre pistão e casco) a verticalidade do casco estavam fora das tolerâncias de projeto. E também resultou em identificar as medidas corretivas a serem tomadas (o alinhamento do sistema de cabos com subseqüentes melhorias parciais; operação estável, porém restrita, a 63% do curso do pistão).

5 REPAROS DE GRANDE PORTE

Empresas especializadas foram convidadas a analisar os relatórios topográficos e oferecer soluções estruturais. A partir de práticas comuns no ramo de tanques industriais de grande porte, três possibilidades foram consideradas.

- Remover as chapas mais deformadas e substituí-las por novas. Seria muito difícil controlar o estado de tensões em volta dos locais de troca (alívio de tensões ao remover as chapas e introdução de tensões ao colocá-las) e impossível garantir que não houvesse mudança de regime de tensão em outros locais do casco criando novos problemas.
- Cortar a base do casco em toda a sua circunferência, suspender o gasômetro por meio de macacos hidráulicos (da mesma forma da sua construção), cortar e aparar a base para tirar a inclinação e colocar tudo de volta na fundação. Prática bastante comum em tanques de grande porte de armazenamento de líquidos. Porém, este gasômetro está inclinado em duas direções (forma de banana).
- Diminuir ou trocar o pistão por um menor e uniforme, sem deformações. Proposta mais atrativa. Da mesma forma, tentar corrigir deformações localizadas no casco podia provocar novas deformações em outros locais, aliado ao fato que o tempo de reparo (e, portanto, o tempo fora de operação) seria quase igual ao tempo

necessário para construir um pistão novo menor, a melhor opção seria mesmo a construção de um novo pistão.

Todas as opções exigiriam longos períodos fora de operação (de 6 a 8 meses) com alto custo pelo trabalho em si e o conseqüente custo ainda mais elevado provocado pela perda de operação. Os reparos de grande porte consideram os componentes rígidos, o pistão e o casco. Como consequência, admite-se a possibilidade de buscar uma solução, considerando o componente flexível, a membrana.

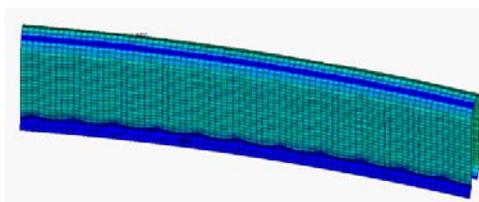
6 MODELAGEM DIGITAL

Conforme comprovado nos levantamentos topográficos e nas próprias considerações técnicas em avaliar as opções de reparo de grande porte, mesmo os dois elementos rígidos (pistão e casco) se movimentam. Eles se deformam pela mudança de regime de tensão (provocada pelo vento, mudança de temperatura, remoção de peças metálicas, solda, etc.). Destes efeitos, obviamente foram considerados na elaboração do projeto. Entretanto, as dimensões e a geometria destes dois componentes rígidos não estão de acordo com as tolerâncias do projeto. Era necessário ter um meio para avaliar a influência da geometria do gasômetro real, que não está de acordo com o projeto.

Após a elaboração do relatório de Causa Raiz, era aparente que a forma de monitorar o comportamento do gasômetro precisava ser melhorada. Inspeções internas foram realizadas semanalmente onde foram realizadas medições do afastamento e inclinação do pistão em cada posição de cabo. Estes dados foram confrontados com as leituras obtidas pelos sistemas instrumentados com registro em tempo integral no sistema de lógica da TK CSA; do laser (inclinação do pistão), do nível de água (inclinação do pistão) e do radar (afastamento do pistão do casco). Com o tempo, foram acrescentadas medições da altura do bulbo, medições das tensões nos cabos e mapeamento das deformações observadas na membrana.

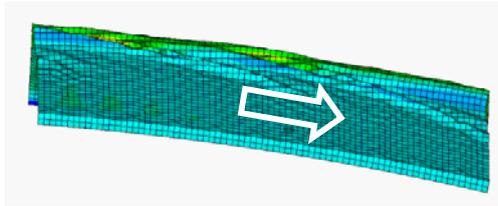
Com este banco de dados, foi possível descrever o mecanismo de falha. Com a passagem de tempo, era observado o deslocamento gradual do pistão do centro do gasômetro. Este deslocamento se desenvolve de forma exponencial. Como limite de segurança foi estabelecido um afastamento mínimo e cada vez que este foi atingido fez-se necessário tirar o gasômetro de operação e o 're-popear'.

Em paralelo, foi contratada a modelagem digital dos componentes do gasômetro. Com esta ferramenta era possível analisar a integração dos três elementos em alturas predefinidas. A modelagem refletiu as observações de campo e confirmou que as deformações na membrana são diretamente ligadas à integração da geometria do pistão e do casco. A modelagem também revelou que o mecanismo de falha da membrana é pelo deslocamento lateral da membrana em relação ao pistão e ao casco.



Fonte: PDL

Figura 7 Membrana na Posição Nominal



Fonte: PDL

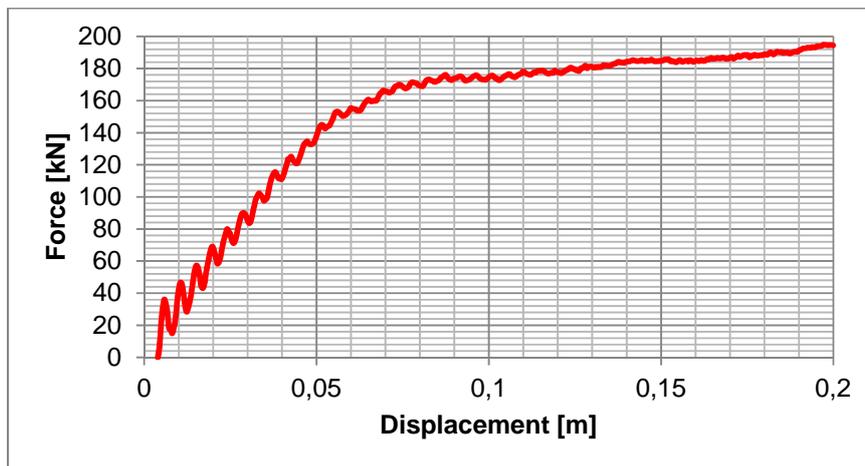
Figura 8 Membrana com Deslocamento Lateral



Fonte: TK CSA

Figura 9 Membrana com Deslocamento Lateral

Quando o deslocamento do pistão provoca um deslocamento lateral da membrana da ordem de grandeza de 52 cm, a membrana perde a sua capacidade elástica e deixa de funcionar como elemento estrutural.



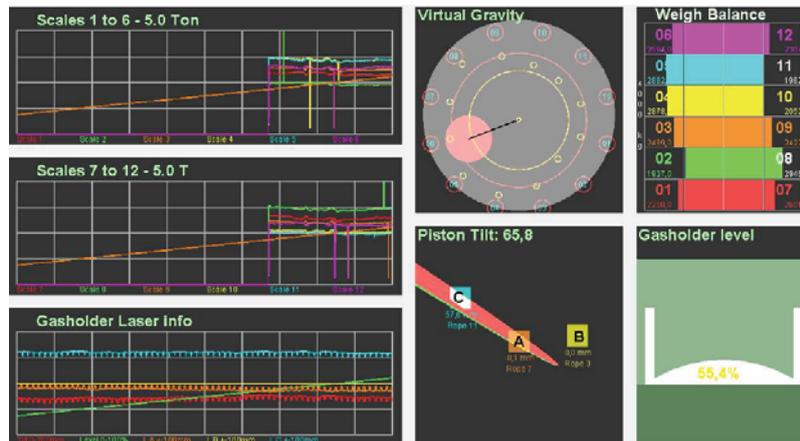
Fonte: PDL

Figura 10 Redução da Resistência da Membrana Deformada

7 RESTRIÇÕES IMPOSTAS À UTILIZAÇÃO DO CURSO DO PISTÃO

A operação do gasômetro foi estabilizada em duas etapas de medidas corretivas. A primeira etapa está descrita em item 4.2 acima: a correção do prumo do sistema de

cabos. A segunda etapa foi também focada no sistema de cabos. Conhecendo que a membrana é levada à falha após deslocamentos excêntricos, células de carga para guindastes com leitura digital transmitida em tempo integral foram fixadas nos cabos e o pistão levado pelo seu curso, no intuito de determinar o melhor ajuste de cabos e lastro para manter o centro de gravidade do pistão no centro do gasômetro.



Fonte: Ferrostaal

Figura 11 Dados Gerados pelas Células de Carga

Conforme pôde ser visto em Figura 11, o melhor ajuste foi alcançado com a aplicação de um “pré-tilt” (“Tilt” é o termo em inglês para a inclinação do pistão). Para um gasômetro deste tamanho a prática é de especificar uma inclinação de pistão entre 25mm a 50mm. Pela Figura 11, pode averiguar que o “piston tilt” é de 65,8mm, medida pelos lasers. Os três lasers estão posicionados no teto do gasômetro e miram em placas presas no domo do fundo do pistão. O número registrado na tela é da maior diferença entre as três leituras. Como as placas não estão fixadas na beirada do pistão e o número registrado é da diferença simples entre duas placas, a inclinação real pode ser até 50% maior do que a registrada. Como o diâmetro do pistão é, aproximadamente, três vezes sua altura, uma inclinação real de 300mm (aproximadamente 200mm pelo sistema do laser), significa uma aproximação ao casco dos dois ‘cantos’, diagonalmente opostos, do topo e do fundo do pistão de 100mm. Com a aplicação destas medidas corretivas, foi possível a operação normal do gasômetro com segurança, sem interrupções, com a utilização do curso do pistão até 63% de volume. Porém, nenhuma tentativa de passar deste limite obteve sucesso. Cada tentativa provocava o mecanismo de falha e a subsequente necessidade de ‘re-popear’ a membrana.

8 A MEMBRANA

Para evitar grandes reparos sem garantia de sucesso, o foco passou a ser a membrana. Conforme descrito no Item 2.0, o sistema Wiggins não funciona se a membrana não for totalmente esticada (na terminologia ‘popeada’). Por ser, na época, um dos dois maiores gasômetros Wiggins já construídos no mundo (o outro sendo seu gasômetro irmão, também construído na TK CSA ao mesmo tempo), o projetista

decidiu aumentar o comprimento da membrana além do estritamente necessário com o intuito de oferecer maior estabilidade do pistão no limite superior do seu curso.

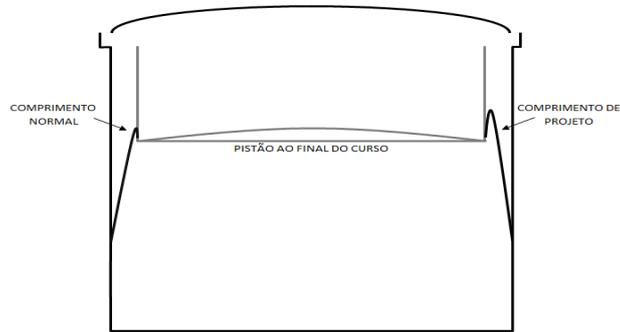


Figura 12 Pistão no Final do Curso:- Membrana 'Popeada'

Figura 12 demonstra como, com o comprimento maior projetado, o seio formado pela membrana oferece maior apoio e estabilidade à base do pistão no final do seu curso. Em contrapartida, o "excesso" de comprimento de membrana oferece um desafio maior na execução do 'pop'.



Figura 13 Pistão no Início do Curso:- Membrana antes de 'Popear'

Figura 13 mostra como a sobra de material acumulado no piso do gasômetro forma dobras. Para a membrana poder ser considerada como 'popeada', todas as dobras têm que ser eliminadas na primeira vez que a membrana é pressurizada e o pistão é levantado até o final do curso. Se não estiver 100% esticada, o 'pop' não é alcançada. Figura 14 (de outro gasômetro) mostra uma membrana com pequenas dobras em formato de bico de pato presentes na fixação à base do pistão. A presença destas pequenas dobras comprova que essa membrana não foi totalmente esticada, não foi 'popeada' e não deve ser colocada em operação.



Fonte: TK CSA

Figura 14 Dobras Remanescentes na Base do Pistão

Para ajudar a eliminar a possibilidade da permanência de dobras na execução do ‘pop’, foi criado um procedimento de ‘pré-pop’. Neste processo, placas de borracha (do mesmo material que a membrana) com presilhas são coladas numa distribuição uniforme na membrana. Cordas são amarradas às presilhas e quando a membrana encontra-se ainda despressurizada (Figura 13) ela é levantada do piso pelas cordas, assim eliminando as dobras da Figura 13.

Porém, após todas essas ações, o curso do pistão continuava restrito ao limite de 63% por volume do gasômetro. A decisão foi tomada de trocar a membrana por uma mais curta para garantir que o pop pleno seja alcançado. Como o projetista original não concordava que o comprimento da membrana fosse o motivo pela operação instável e subsequente restrição à utilização do curso do pistão, o fornecedor de tecnologia e a fabricante de membrana foram trocados.

9 RESULTADOS

A troca da membrana original por uma 1,4m mais curta não desconsiderou o objetivo do projeto original de oferecer maior estabilidade ao pistão no final do curso. Este efeito foi preservado ao sacrificar em 1.300 mm (3%) o curso do pistão (e a capacidade operacional do gasômetro), abaixando as hastes que acionam as válvulas de alívio e reconfigurando o sistema de controle. Assim o seio de apoio visto em Figura 12 foi mantido, mas as dobras da Figura 13 foram eliminadas. O ‘pop’ foi alcançado pelo procedimento normal, sem apelar pelo recurso de ‘pré-pop’.

O gasômetro está em operação estável, plena e sem restrições e o pistão já percorreu mais de 45 km de curso em pouco mais de três meses sem registro de deslocamento do centro do gasômetro. Inspeções internas continuam a ser realizadas, porém, agora não mais semanalmente e sim na frequência sugerida pelo manual de operação para um gasômetro normal.

A indisponibilidade do gasômetro do BOF desvia recursos de gás do Alto Forno enriquecido com gás natural para a Aciaria. Portanto, existem dois indicadores que representam o ganho operacional alcançado com as mudanças realizadas. Primeiro, o ganho em capacidade de geração de energia elétrica e, segundo, a economia no consumo de gás natural. Em termos simples, houve um ganho absoluto de 37% dos parâmetros nominais destes dois indicadores. Sendo:

BOF GAS HOLDER		Nominal (per h)	Ganho/Economia Absoluto Diário (37% do nominal)
1.	Perda de Gás do AF desviado para a Aciaria	48.155 Nm ³ /h	427.616 Nm ³ /dia
	Perda de Geração de Energia	21 MW/h	186 MW/dia
2.	Consumo de Gás Natural	3.253 Nm ³ /h	28.887 Nm ³ /dia

Fonte: TK CSA

Tabela 1 Ganhos Operacionais

10 CONCLUSÃO

Assim como o Gasômetro BOF da TK CSA é o único do tipo Wiggins no mundo deste tamanho operando com gás de baixa pressão, os estudos realizados sobre ele, objeto deste trabalho, são inéditos. Não há outro trabalho comparável.

Agora que o pistão opera acima do nível de 63% até o final do curso utilizado em operação, temos o registro dos radares do perfil de afastamento do pistão do casco no curso completo.

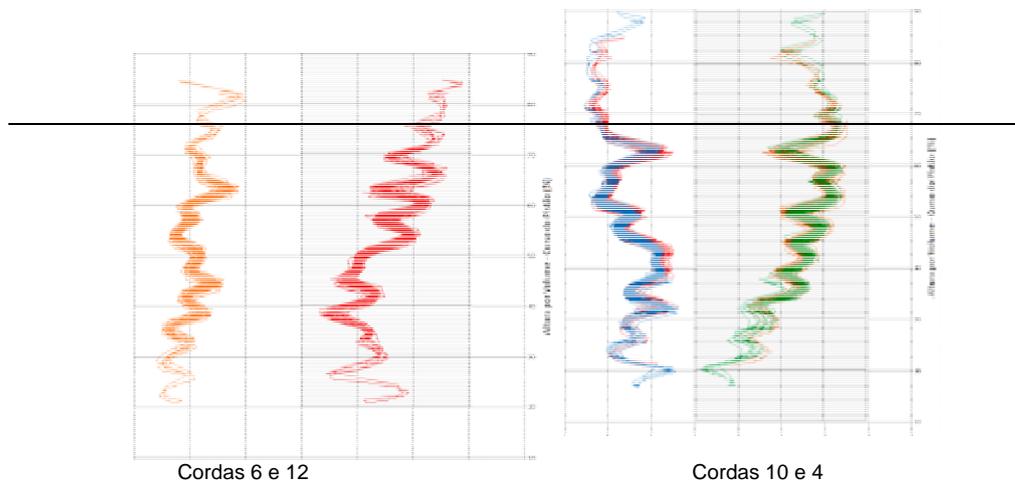


Figura 15 Perfil do Afastamento do Pistão do Casco (pelo Radar)

Pode-se averiguar que há um estrangulamento brusco logo acima do nível de 63% por volume, a altura limite para a membrana anterior. Provavelmente, era este o gatilho que provocava o mecanismo de falha, exigindo realizar o 're-pop'.

Nas inspeções internas realizadas no gasômetro após a troca de membrana, as deformações observadas são do mesmo formato constatadas na membrana anterior. e aparecem nas mesmas posições. Isto confirma a influência das deformações geométricas no pistão e no casco sobre a membrana. Entretanto, o efeito não é o mesmo. As deformações agora são mais suaves e a nova (e mais curta) membrana permanece estável, mesmo passando pela região de estrangulamento. A solução foi alterar a geometria da membrana, o componente flexível.

REFERÊNCIAS

- 1 Relatório de Análise de Causa Raiz – Fluor – Frascarelli e Grande, 2011