

Estudo do comportamento de esferas abrasivas utilizadas como artefatos de limpeza de trocadores de calor

Study of the behavior of abrasive spheres used as heat exchanger cleaning artifacts

V. H. De Oliveira Júnior¹, M.N. Frota¹, Gilson Valente²

¹ Programa de Pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 22541-900, Brasil; ² Usina Fontes Nova, Pirai, RJ, Light Energia S/A

E-mail: Frota@esp.puc-rio.br

Resumo: O trabalho estuda o comportamento mecânico de seis tipos de esferas abrasivas, de três fabricantes distintos, utilizadas como artefato de um sistema de limpeza de trocadores de calor de hidrogeradores. A caracterização do material fundamenta-se em (i) análises química e bioquímica do material da incrustação e da água, coletados no interior dos trocadores de calor e (ii) em resultados de ensaios mecânicos do material das esferas utilizadas para remover a incrustação. Este esforço de pesquisa objetiva disponibilizar informações-chave para orientar a fabricação de esferas abrasivas capazes de atender especificações técnicas e características de um determinado processo de limpeza, assim estimulando o interesse de potenciais fabricantes no país.

Palavras-chave: *esferas abrasivas; trocador de calor; limpeza de trocadores de calor*

Abstract: The work studies the mechanical behavior of six types of abrasive spheres, from three different manufacturers, used as an artifact of a system of cleaning of heat exchangers of hydro generators. The characterization of the material is based on (i) chemical and biochemical analyzes of the fouling material and water collected inside the heat exchangers and (ii) results of mechanical tests of the material of the beads used to remove the existing fouling. This research effort aims to provide key information to guide the manufacture of abrasive beads to meet technical specifications and characteristics of a particular cleaning process, thus stimulating the interest of potential manufacturers in the country.

Keywords: *Abrasive spheres; heat exchanger; cleaning of heat exchangers*

1. INTRODUÇÃO

A formação de incrustação em trocadores de calor (TC), que tão drasticamente compromete a sua efetividade térmica, é uma preocupação que acompanha a indústria desde a revolução

industrial [1,2]. Na busca de alternativas tecnológicas para mitigar esse indesejável problema, diversas técnicas de limpeza têm sido desenvolvidas, a exemplo da técnica *on-line* que circula esferas abrasivas no interior dos tubos do trocador para remover, ainda que parcialmente, o

fouling neles incrustado [3]. Embora invasiva, a técnica proposta reflete uma tecnologia inovadora, menos agressiva, de limpeza de trocadores de calor. Para assegurar eficácia desta técnica de limpeza, as esferas devem circular com interferência nos dutos do trocador de calor. Para o caso de esferas abrasivas macias, o seu diâmetro não deve exceder em 10% o diâmetro dos tubos do TC, e em 1%, para o caso de esferas abrasivas duras [4]. Experimentos preliminares realizados indicam que, para todos os tipos de esferas ensaiadas, velocidades de esferas circulantes entre 1,5 m/s e 2 m/s também contribuem para a eficácia do processo de limpeza por meio dessa técnica [3]. Entendendo que existe demanda para essa técnica de limpeza no país e que, no âmbito da pesquisa de mercado realizada, não se conseguiu identificar nenhum fabricante brasileiro de esferas abrasivas, cujas características técnicas atendessem aos requisitos técnicos impostos pelo método de limpeza proposto, o presente trabalho estudou o comportamento mecânico de esferas produzidas por três fabricantes estrangeiros.

2. COMPORTAMENTO MECÂNICO

O estudo envolveu quatro ensaios específicos, a seguir caracterizados.

2.1 Ensaio de encharcamento

Seis amostras de esferas abrasivas de três fabricantes distintos (denominados A, B e C) foram embebidas em água (fluido de trabalho do TC) para avaliar alterações de seu diâmetro. Variações indesejáveis do diâmetro da esfera podem comprometer a eficácia do processo de limpeza, possibilitando, inclusive, a sua retenção no interior dos tubos do TC durante o processo de remoção da incrustação. São elas: esfera do tipo P220, do fabricante A (israelense); do tipo S110, do fabricante B (australiano) e esferas P150, S160, S130 e P135, do fabricante C (alemão). O diâmetro dessas esferas foi monitorado (medição com paquímetro calibrado) por um período de 36 h, quando afogadas em água, em repouso, na temperatura ambiente, em recipientes individuais

controlados. Em todos os casos, as esferas boiaram no início do ensaio, mesmo após terem sido comprimidas após afogadas, para expulsar o ar preso em seu interior. Ou seja, a massa específica de todas as esferas se mostrou inferior à da água. Conforme ilustrado na Figura 1, após o encharcamento, todas as esferas afundaram, resultado do preenchimento de água no material poroso da esfera.



Figura 1 - Ensaio de encharcamento por 36 h

A Tabela 1 sintetiza os resultados desse ensaio de encharcamento, enquanto os gráficos da Figura 2 ilustram a taxa de crescimento das esferas ao longo das 36 horas (mais intenso nas primeiras 18 h), exibindo um esperado comportamento assintótico.

Tabela 1. Resultados do ensaio encharcamento

| Fab. | Código | $\varnothing_{\text{seca}}$ (mm) | $\varnothing_{\text{saturada}}$ (mm) | $\Delta\varnothing$ (mm) | $\Delta\varnothing$ (%) |
|------|---------|-------------------------------------|---|-----------------------------|----------------------------|
| A | 14-P220 | 14,56 | 14,65 | 0,09 | 0,62 |
| B | 23-S110 | 23,34 | 26,52 | 3,18 | 13,6 |
| C | 22-S160 | 22,75 | 23,10 | 0,35 | 1,55 |
| | 22-P150 | 22,34 | 22,45 | 0,11 | 0,49 |
| | 22-P135 | 22,44 | 23,43 | 0,99 | 4,41 |
| | 22-P130 | 22,78 | 22,99 | 0,21 | 0,92 |

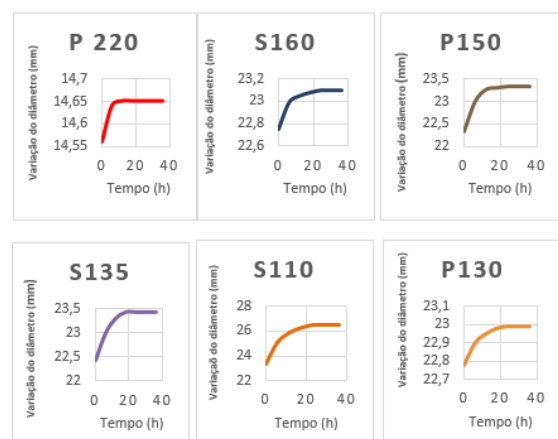


Figura 2. Crescimento do diâmetro da esfera

2.2 Análises química e biológica da incrustação

Com o propósito de explicar o indesejável mecanismo de formação da incrustação, e

comprovado por análises químicas e biológicas das águas e resíduos coletados no interior dos trocadores de calor, foi possível comprovar que a incrustação é de natureza bio; i.e.: *biofouling*. A incrustação origina-se de matéria orgânica presente nas águas mais profundas dos reservatórios, isolados da luz solar, que estimulam a proliferação de micro-organismos anóxicos (que se adaptam ao meio na ausência de oxigênio). O crescimento desordenado em colônias é estimulado pela grande oxigenação das águas após a sua circulação pela caixa-caracol das turbinas hidráulicas. Em termos práticos, o material identificado nas águas estudadas é semelhante aos lodos ativados usualmente presentes em estação de tratamento biológico. Análises por microscopia óptica mostraram agregados de crescimento bacteriano, com algas filamentosas (cianobactérias) e algas bacilariofíceas.

2.3 Determinação da força de arrasto

Conforme ilustrado na Figura 3, experimentos foram realizados em trocadores de calor de uma usina hidrelétrica, logo após a sua abertura, antes de serem submetidos ao tedioso processo de varetagem mecânica para remover o excesso de incrustação. Com o auxílio de um dinamômetro calibrado e de uma esfera abrasiva presa na sua extremidade, foi possível medir a força de arrasto requerida para induzir a iminência de movimento da esfera quando submetida a um tubo incrustado.



Figura 3. Medição da força de arrasto

Para o caso das águas da usina estudada, réplicas de medições em diferentes trocadores de calor mostram que a força de arrasto para remover o fouling varia entre 3 N e 5 N, dependendo do tempo de funcionamento do trocador de calor. Esta é uma informação crítica para definir a abrasividade da esfera a ser construída para uma determinada aplicação.

2.4 Determinação do Módulo de Elasticidade

Fazendo uso de uma Máquina de Ensaio Universal, modelo Instron 5500R, foi possível determinar a Constante Elástica do material da esfera. Combinado com os resultados da Força de Arrasto, foi possível determinar a resistência induzida pelo fouling na esfera abrasiva. A Figura 4 ilustra a montagem experimental para determinação da Constante Elástica do material da esfera. Medições de compressão e do tempo de contração da esfera, realizados para diferentes orientações na esfera em relação à mesa de suporte (horizontal, vertical e inclinada de um ângulo de 45° em relação a um eixo de referência), permitiram determinar uma média da deformação do material da esfera.

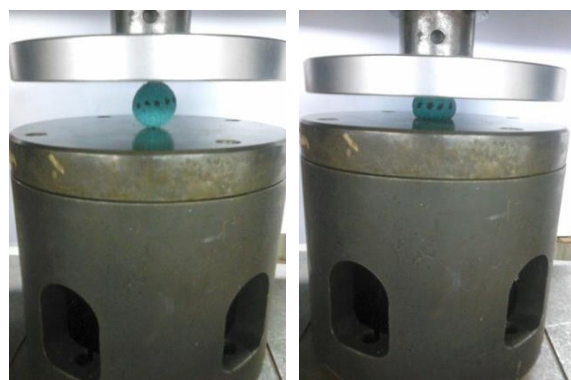


Figura 4. Ensaio de compressão da esfera

Um novo ensaio de carga foi realizado em duas etapas. O primeiro, com uma força de compressão de 5 N, seguido de outro com carga de 2,1 N, que correspondem às forças máxima e média, obtidas nos ensaios de arrasto. As esferas foram

embebidas em tinta preta e comprimidas com uma carga que reproduziu os valores da força de arrasto acima especificados. A resistência à compressão percebida pela esfera ensaiada foi medida pela marca impressa (impressão digital), que deixa registrada numa fita de papel milimetrado padrão. Desta forma, as áreas das respectivas esferas submetidas a valores de diferentes de força foram medidas, como observado na Tabela 2.

Essa marca (área de deformação da esfera) é importante para a determinar o modulo de elasticidade do material. As esferas S130 e P110, foram novamente os pontos críticos do ensaio realizado. A primeira, com maior área impressa, possui um modulo de elasticidade de $0,11 \text{ N/mm}^2$, o menor valor registrado. A segunda esfera, a mais rígida, possui um modulo de $0,74 \text{ N/mm}^2$, o maior valor obtido nos ensaios realizados.

Tabela 2 - Área de contato da esfera após a aplicação da força de 5 N.

| Imagem | Pegada | Medida 1 (mm ²) | Medida 2 (mm ²) | Medida (mm ²) |
|---|---|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|  P220 |  | 156 | 161 | 158,5 |
|  P150 |  | 225 | 224 | 224,5 |
|  S160 |  | 235 | 240 | 237,5 |
|  S130 |  | 140 | 142 | 141 |
|  P135 |  | 298 | 302 | 300 |
|  S110 |  | 377 | 363 | 370 |

O conhecimento do modulo de elasticidade do material da esfera constitui informação-chave para a sua construção, o que permitirá construir uma esfera que seja resiliente e resistente à ação agressiva do fouling.

3. CONCLUSÕES

O acervo de informações técnicas disponibilizadas contribui para estimular um potencial fabricante de esferas abrasivas a produzi-las para atender demandas específicas associadas a um determinado processo de limpeza industrial.

4. REFERÊNCIAS

- [1] T.R. Bott. Fouling Heat exchanger. 1995. Volume 1. Birmingham.
- [2] M.N. Frota; Ticona E. M.; Neves, A. V.; R.P.M. Silva; Braga, S.L.; G.P. Valente Jr. *On-line cleaning technique for mitigation of biofouling in heat exchangers: A case study of a hydroelectric power plant in Brazil*. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 53, p. 197-206, 2014.
- [3] V.H. Oliveira JR. Validação metrológica de alternativa tecnológica para mitigação de incrustação em trocadores de calor. 2015. Dissertação em Metrologia, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [4] M. R. Jalarirad and M.R. Malayeri. A criterion for the selections of projectiles for cleaning tubular heat exchanger. 2013. International conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning. Budapest