

## ANÁLISE DE MICROABRASÃO EM AÇOS INOXIDÁVEIS SUPERMARTENSÍTICOS

Coelho, G.B., Universidade Federal de Uberlândia, gustavo\_borgess@hotmail.com

Silva Jr., W.M., Universidade Federal de Uberlândia, washington@femec.ufu.br

**Resumo.** Aços inoxidáveis supermartensíticos são materiais resistentes a corrosão com aplicações promissoras na indústria química, petroquímicas e em setores de geração de energia. O material utilizado neste trabalho 13%Cr (composição: 0.0278 %C; 12.21 %Cr; 5.8 %Ni; 1.95 %Mo; 0.519 %Mn; 0.28 %Ti; 0.0112 %P; 0.0019 %S; 0.013 %N em massa percentual) é indicado para aplicações que requeiram alta resistência ao desgaste abrasivo e corrosivo devido à sua elevada resistência mecânica e dureza comparada aos demais aços inoxidáveis. Neste trabalho a resistência ao desgaste microabrasivo foi avaliada através do teste conhecido como esfera livre. A microestrutura e as propriedades mecânicas foram modificadas pelos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Os resultados apontaram uma flutuação máxima de 21% na resistência ao desgaste microabrasivo. Além disso, a tenacidade revelou-se como parâmetro mecânico mais influente no controle do comportamento do desgaste microabrasivo.

**Palavras chave:** microabrasão, aço inoxidável supermartensítico, teste esfera-fixa.

### 1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores entraves existentes nos setores de produção industrial remete ao desgaste prematuro dos materiais envolvidos em processos de fabricação. Em termos gerais, o impacto gerado por desgaste na economia de um país fica compreendido entre 1 – 10% do PIB (ABM, 2009).

Dentre os tipos de desgaste, abrasão se notabiliza por responder a cerca de 50% das causas que levam a processos de falhas e perdas (Eyre, 1976). Uma vertente surgida no âmbito do desgaste abrasivo refere-se à microabrasão. O que difere esta classe de desgaste em relação à primeira consiste em uma significativa redução na escala de valores da dimensão da partícula abrasiva empregada nos testes e observada em situações reais de trabalho bem como do coeficiente de desgaste gerado nestas condições.

Neste trabalho, foi analisada a influência dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento sobre comportamento ao desgaste micro-abrasivo de aços inoxidáveis supermartensíticos (SMSS). A escolha de tal material se justifica pois alterações em sua composição química promovem um aprimoramento de algumas propriedades mecânicas como, por exemplo, a tenacidade, a soldabilidade e a resistência à corrosão (Silva *et al.*, 2011). Por isso, estes aços são potencialmente indicados em setores como a indústria química e petroquímica e em processos de geração de energia. Já simulação do desgaste foi realizada através de testes de esfera-livre.

### 2. METODOLOGIA E MATERIAIS

#### 2.1. Materiais

A composição química das amostras de aço inoxidável super-martensítico utilizadas neste trabalho é apresentada na Tab. 1. Enquanto que nos aços martensíticos convencionais a concentração de carbono gira em torno de 1%, nos SMSS este limite não ultrapassa o valor de 0,03%. Segundo Da Silva *et al.* (2011), esta peculiaridade aliada a adições complementares de níquel e molibdênio é o principal fator que define a distinção entre estes materiais.

Tabela 1. (a) Composição química do aço inoxidável super-martensítico (em massa percentual).

| Elemento Químico    | C      | Cr    | Ni  | Mo   | Mn    | Ti   | P      | S      | N     |
|---------------------|--------|-------|-----|------|-------|------|--------|--------|-------|
| Peso Percentual (%) | 0,0278 | 12,21 | 5,8 | 1,95 | 0,519 | 0,28 | 0,0112 | 0,0019 | 0,013 |

Inicialmente, as amostras foram temperadas a temperatura de 1000°C durante uma hora, sendo em adiante resfriadas a partir de submersão em água. Em seguida, foi empregado o tratamento de revenimento a quatro diferentes temperaturas, visando avaliar o seu efeito sobre o desempenho ao desgaste micro-abrasivo. A Tab. 2 exibe os valores da temperatura e intervalo de tempo adotados na aplicação dos tratamentos térmicos.

Tabela 2. Condições de tratamento térmico e identificação das amostras

| Amostra | Tratamentotérmico                                                                                                                                |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T       | Austenitização a 1000°C durante 1 hora.                                                                                                          |
| TR300   | Austenitização a 1000°C durante 1 hora, seguido por revenimento a 300°C ao longo de 1hora.                                                       |
| TR500   | Austenitização a 1000°C durante 1 hora, seguido por revenimento a 500°C ao longo de 1hora.                                                       |
| TR650   | Austenitização a 1000°C durante 1 hora, seguido por revenimento a 650°C ao longo de 1hora.                                                       |
| DT      | Austenitização a 1000°C durante 1 hora, seguido por duplo revenimento: o primeiro a 600°C ao longo de 2 horas e o segundo 670°C durante 2 horas. |

Para utilização deste material nos ensaios de esfera livre, cada uma das cinco amostras referenciadas na Tab.2 foi usinada em forma de paralelepípedo possuindo dimensões de 10 x 10 x 35 mm. Posteriormente, as superfícies destas amostras foram respectivamente lixadas e polidas a fim de garantir que as marcas desgaste produzidas pelos testes de microabrasão fossem suficientemente nítidas.

## 2.2. Ensaios de microabrasão

A avaliação do comportamento ao desgaste microabrasivo foi feita através do equipamento Calowear, uma variante da configuração do teste por esfera livre (Rutherford e Hutchings, 1997), esquematicamente ilustrado na figura 1. Neste método, a esfera gira sobre a amostra na presença de um fluido abrasivo (Teles *et al.*, 2014). A esfera utilizada foi de aço martensítico com diâmetro de 25,4 mm. Por sua vez, o fluido abrasivo era composto por abrasivos de sílica dissolvidos em água destilada a uma proporção de 100 mg de abrasivo por  $\text{cm}^3$  de água. Essa concentração é considerada baixa de acordo com a literatura (Trezona *et al.*, 1999), e foi utilizada com o intuito de favorecer a ocorrência de deslizamento das partículas abrasivas entre o corpo e o contra corpo.

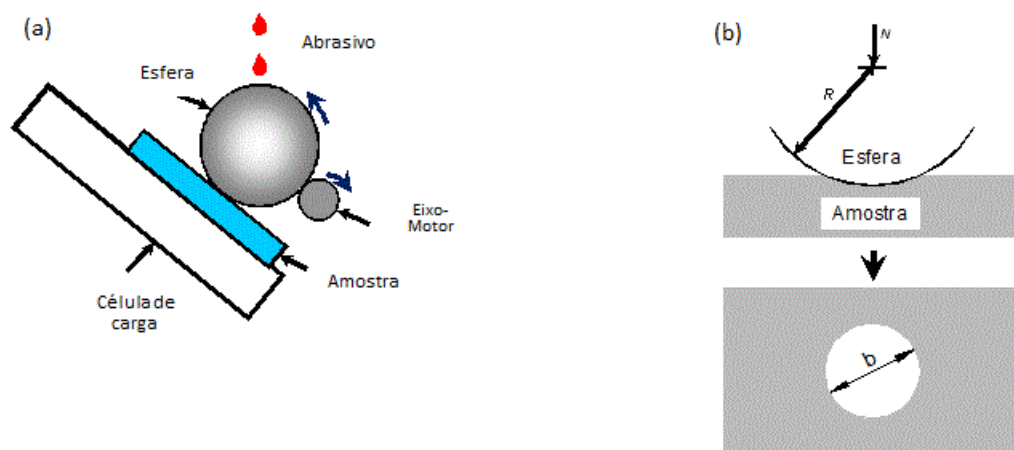


Figura 1. (a) Esquema do teste de microabrasão. (b) Esquema de visualização da impressão de desgaste

Dentre os parâmetros tribológicos que podem ser controlados pelo operador do equipamento, podem ser destacados a carga normal aplicada sobre a amostra e a rotação da esfera de ensaio. Nesta condição a força aplicada foi de  $0,130 \pm 0,05$  N. A carga foi monitorada, continuamente, por uma célula de carga. Já rotação do eixo foi mantida constante e a velocidade tangencial entre esfera e amostra foi de  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ . A definição de tais parâmetros foi ajustada a partir de uma etapa pré-testes e, posteriormente, foi adotada como referência nos ensaios efetivos. Tab.3 aponta todos estes parâmetros ajustados nesta etapa.

Tabela 3. Valores dos principais parâmetros utilizados no teste de microabrasão.

| Diâmetro da esfera | Força normal aplicada | Rotações da esfera | Velocidade transversal da esfera | Distância deslizada por teste | Tempo de duração por teste | Quantidade de testes | Quantidade de baterias | Taxa de gotejamento      |
|--------------------|-----------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|
| 25,4mm             | 241±20 mN             | 150 rpm            | 0,2 m/s                          | 13,82m                        | 2 minutos                  | 15                   | 5                      | 1 gota a cada 5 segundos |

Para o cálculo do coeficiente de desgaste produzido ao longo dos testes, foi assumido que a geometria da cratera de desgaste reproduz a forma esférica do contra-corpo que a originou (Fig. 1b). Satisfeita esta condição, o volume ( $V$ ) pode ser calculado por meio da equação 1 (Rutherford e Hutchings, 1997; Adachi e Hutchings, 2003), onde  $R$  é o raio do contra-corpo e  $b$ , o raio da cratera. Em materiais homogêneos e não revestidos, o volume de desgaste pode ser expresso em função da distância total de deslizamento,  $S$ , e da força normal de contato,  $N$ , por um simples modelo equivalente a equação de Archard para desgaste por deslizamento (Eq.2) (Adachi e Hutchings, 2003).

$$V = \frac{\pi b^4}{64R} \quad (1)$$

$$V = kSN \quad (2)$$

Ainda na etapa pré-testes, percebeu-se que ensaios com duração de 30 minutos eram suficientes para o alcance do regime permanente de desgaste (Da Silva, 2003). Por fim, o volume de desgaste foi calculado através da Eq. (1) e o coeficiente de desgaste pela Eq. (2).

### 3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tab.4 apresenta os resultados obtidos para o coeficiente de desgaste. Nela também estão apontados os valores de dureza Vickers e energia de impacto das cinco amostras estudadas.

Tabela 4. Resultados obtidos para o coeficiente de desgaste ( $K$ ), dureza média (HV/ 40kgf) e energia de impacto das amostras de SMSS em termos dos tratamentos térmicos aplicados a ela.

| Amostra | $K$  | HV 40 | Energia de Impacto |
|---------|------|-------|--------------------|
| T       | 1,49 | 296±3 | 159                |
| TR-300  | 1,32 | 303±5 | 154                |
| TR-500  | 1,51 | 331±4 | 135                |
| TR-650  | 1,19 | 265±8 | 191                |
| DT      | 1,38 | 270±9 | 188                |

De maneira geral, a aplicação dos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento impactam de maneira significativa na resistência ao desgaste microabrasivo no material de interesse. Verificou-se uma diferença máxima do coeficiente de desgaste de 21% que ocorreu entre as amostras TR-500 e TR-650. Os resultados de  $k$  para cada uma das cinco amostras estão dispostos no gráfico da Fig. 2, em que cada ponto é tomado como a média aritmética de cada sequência medida ao longo dos cinco testes realizados por amostra até a obtenção do regime permanente de desgaste, alcançado quando o coeficiente de variação dos valores  $k$  foi inferior a 8%, considerando os últimos quatro pontos medidos.

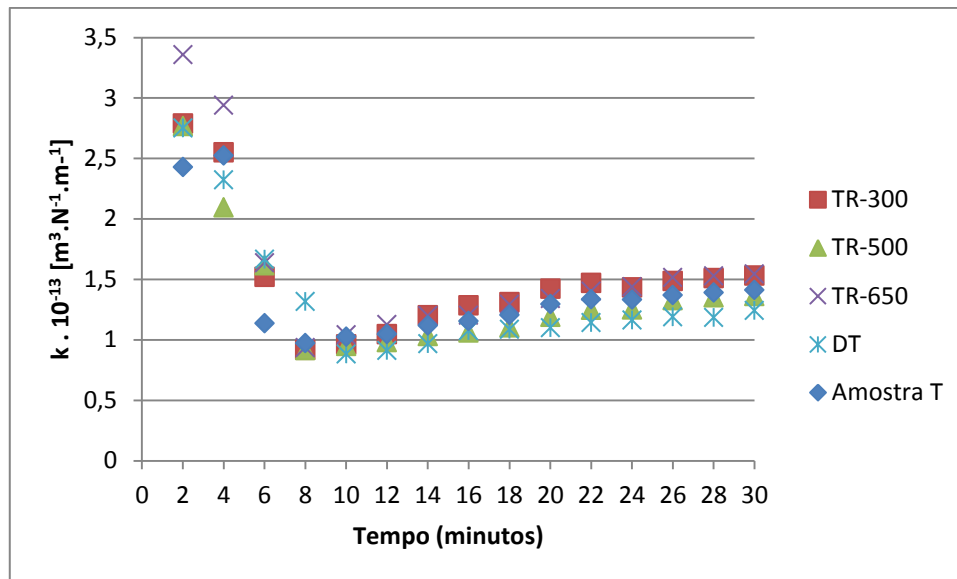


Figura 2. Coeficiente de desgaste em função do tempo de execução do ensaio. Neste gráfico,  $\blacklozenge$  representa o coeficiente de desgaste para amostra T,  $\blacksquare$  amostra TR-300,  $\blacktriangle$  amostra TR-500,  $\times$  amostra TR-650 e  $\times$  amostra DT.

A literatura científica estabelece que o comportamento ao desgaste abrasivo seja orientado predominantemente em função da dureza e da tenacidade (Zum Gahr, 1987). Todavia, os resultados apontados pela Tab. 4 demonstram que para o SMSS em estudo, a tenacidade se mostrou mais influente no controlado comportamento microabrasivo. De fato, analisando a Tab. 4, verifica-se que a amostra com maior energia de impacto (TR-650) é aquela que apresenta maior resistência ao desgaste microabrasivo, sendo, neste caso, a recíproca verdadeira, isto é, a amostra TR-500 que possui menor energia de impacto é também a menos resistente ao desgaste microabrasivo. O gráfico da Fig. 3 evidencia essa tendência de queda do coeficiente de desgaste a partir do aumento da energia de impacto das amostras em questão.

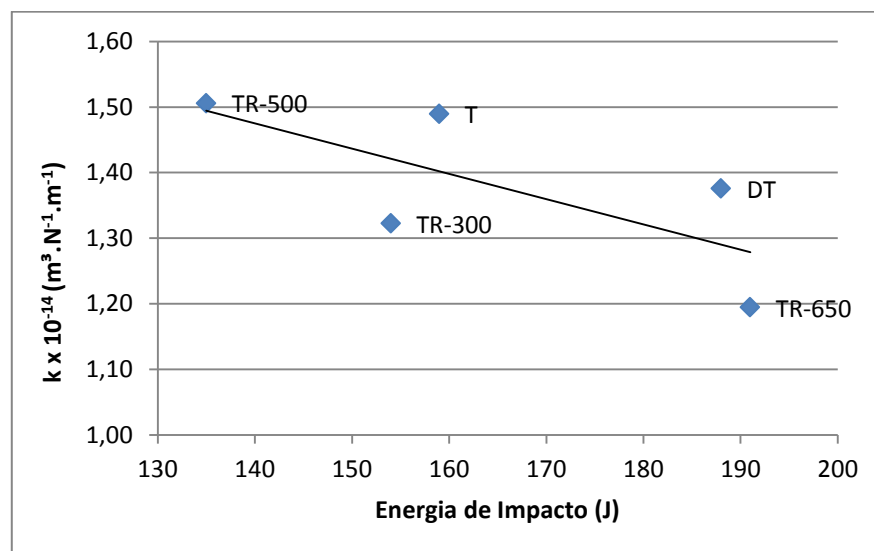


Figura 3. Gráfico do coeficiente de desgaste em função da energia de impacto das amostras de SMSS.

O aumento da resistência ao desgaste entre as amostras T e TR-300 mesmo com a redução da energia de impacto é atribuída precipitação de partículas de Mo<sub>2</sub>C no intervalo de temperatura de revenimento entre 300 e 500°C, respondendo pelo acréscimo de dureza entre estas amostras.

#### 4. CONCLUSÕES

- As propriedades mecânicas do aço inoxidável supermartensítico investigado neste trabalho se mostraram fortemente dependentes dos tratamentos térmicos aplicados a ele.
- O tratamento térmico de duplo revenimento eleva consideravelmente a concentração de partículas de austenita. Entretanto, este aumento de partículas não está diretamente ligado a um ganho na energia de impacto.
- O parâmetro mecânico que melhor se alinha aos resultados de desgaste microabrasivo é a energia de impacto. A amostra mais tenaz (TR-650) é a mais resistente enquanto a menos tenaz (TR-500) apresenta o maior o coeficiente de desgaste.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. “<http://www.abmbrasil.com.br/>”, página acessada entre Julho-Novembro/2009.
- Eyre, T. S., The mechanisms of wear. Tribology International, v. 11, p. 91-96, 1978.
- Siva, V.A., Da Silva, G.F., Tavares, S.S.M. e Pardal, J.M., Influence of tempering parameters on the mechanical properties of a Ti alloyed supermartensitic stainless steel. 21<sup>st</sup> Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011.
- Da Silva, G.F., Tavares, S.S.M., Pardal, J.M., Silva, M.R. e De Abreu, H.F.G., Influence of heat treatments on toughness and sensitization of a Ti-alloyed supermartensitic stainless steel. J Mater Sci, v. 46, p. 7737-7744, 2011.
- Rutherford, K. L., Hutchings, I. M., Theory and application of a micro-scale abrasive wear test. Journal of Testing and Evaluation, v. 25, p. 250-260, Mar 1997.
- ZumGhar, K. H., Microstructure and wear of materials. Elsevier, 1987, p.132-350.
- Trezona, R. I., Allsopp, D. N. e Hutchings, I. M., Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. Wear, v. 225–229, Part1, p. 205-214, 1999.
- Da Silva, W.M., Efeito da pressão de compactação e tamanho do pó de ferro na micrabrasão do ferro sinterizado a vapor, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – MG, Brasil, 2003, 98 p..
- Teles, V.C., Victor, S., De Oliveira, C.A.S.; De Mello, J.D.B. e Da Silva, W.M., Influência da partícula abrasiva na resistência à abrasão de revestimentos CRAISiN multicamada/gradiente. POSMEC, 2014.
- Adachi, K. e Hutchings, I.M., Wear-mode mapping for the micro-scale abrasio test, Wear 255 (2003) 23–29.

#### 6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CAPES, a FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio financeiro.

#### 7. ABSTRACT

Martensitic and supermartensitic stainless steels are corrosion resistant materials with broad application in chemical, petrochemical and power generation industrial sectors. The supermartensitic stainless steel 13 %Cr (composition: 0.0278 %C; 12.21 %Cr; 5.8 %Ni; 1.95 %Mo; 0.519 %Mn; 0.28 %Ti; 0.0112 %P; 0.0019 %S; 0.013 %N in wt%) is indicated for applications that require corrosive and abrasive wear resistance due to its higher mechanical resistance and hardness in comparison to other stainless steels. In this work the abrasive wear resistance of supermartensitic stainless steel was characterised using the test known as the free ball. The microstructure and mechanical response of supermartensitic stainless steel was modified by heat treatments of quenched and tempered. The results show a maximum fluctuation of 21% in resistance to wear microabrasive. In addition, the tenacity was revealed as mechanical most influential parameter in controlling the behavior of the wear microabrasive.

#### 8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.