

## **CARACTERIZAÇÃO DO MECANISMO DE DESGASTE ABRASIVO PRESENTE EM LIGAS INOXIDÁVEIS Fe-Mn-Si-Cr-Ni COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA – Parte 2: INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E EVOLUÇÃO DA TAXA DE DESGASTE**

Christian Egidio da Silva, [christianegidio@gmail.com](mailto:christianegidio@gmail.com)<sup>1,2</sup>  
Jorge, [jotubo@ita.br](mailto:jotubo@ita.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 12.228-900, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>2</sup>Gerdau Aços Especiais, 12.442-260, Pindamonhangaba, SP, Brasil

**Resumo:** Foi analisada a influência da composição química para diferentes temperaturas de austenitização no comportamento de desgaste por deslizamento em dois aços inoxidáveis que apresentaram efeito de memória de forma usando ensaio tribológico do tipo pino-contra-lixo. Foram ensaiados pinos com composição química Fe-10,3Mn-5,3Si-9,9Cr-4,9Ni-0,006C e Fe-14,2Mn-5,3Si-8,8Cr-4,6Ni-0,008C após serem submetidos a austenitização nas temperaturas de 900° e 1.050°C, seguidos de resfriamento forçado em água na temperatura ambiente. As superfícies desgastadas foram avaliadas através de observações em microscópio ótico e estereomicroscópio. O perfil de rugosidade foi analisado através de microscópio ótico acoplado a um analisador de imagens. A taxa de desgaste (massa perdida por distância percorrida) foi avaliada após consecutivos ciclos de ensaio para avaliar a evolução da taxa de desgaste com o tempo. A liga com menos manganês e mais cromo apresenta uma resistência ao desgaste consideravelmente superior (entre 17,5% e 18,9% melhor). O aumento da temperatura de austenitização proporcionou um ligeiro incremento da taxa de desgaste (piorou entre 3,0% e 4,1%). A composição química exerce influência muito mais significativa no mecanismo de desgaste do que a temperatura de austenitização.

**Palavras-chave:** desgaste, aço inoxidável, Fe-Mn-Si-Cr-Ni, efeito de memória de forma, composição química

### **1. INTRODUÇÃO**

Na última década, os aços inoxidáveis com efeito de memória de forma têm sido estudados de forma intensa como substitutos às tradicionais ligas Ni-Ti, apresentando de uma forma geral menor custo, boa trabalhabilidade, boa usinabilidade e também boa soldabilidade. No entanto, ainda não têm sido plenamente empregados devido a sua menor recuperação de forma, quando comparadas às ligas Ni-Ti tradicionais. Muitas vezes estes aços inoxidáveis necessitam da realização de ciclos de treinamento, que para algumas geometrias mais complexas podem tornar-se bastante complicados devido à dificuldade e complexidade para a aplicação da carga, encarecendo a liga (Otubo et al., 1997; Kajiwarra, 1999; Wen et al., 2004; Jee et al., 2004).

O Efeito de Memória de Forma em ligas inoxidáveis está associado à transformação martensítica não termoelástica  $\gamma$  (CFC)  $\leftrightarrow$   $\epsilon$  (HC), Trabalhos recentes (Otubo et al., 2007) têm demonstrado que o tamanho de grão da fase austenítica é um dos parâmetros importantes no grau de recuperação de forma bem como em outras propriedades como a tensão de escoamento, dureza e teor de martensita induzida.

Existem evidências que a capacidade de recuperação de forma depende do tamanho de grão austenítico e da orientação cristalográfica. Trabalhos desenvolvidos pelos autores têm mostrado que o tamanho de grão austenítico varia significativamente com a temperatura de austenitização (Otubo et al., 2002; Otubo et al., 2007; Silva et al., 2008a; Silva e Otubo, 2008; Silva et al., 2008b; Silva e Otubo, 2009). Vale salientar que um número bastante reduzido de estudos têm avaliado a influência do tamanho de grão austenítico e orientações cristalográficas na capacidade de recuperação de forma de alguns tipos de aços inoxidáveis.

Trabalhos anteriores (Otubo et al., 2002;2007) sugerem que uma granulometria fina favorece uma melhor recuperação de forma. Segundo Bergeon et al. (2000), se a deformação for grande ou então se o grão for grosseiro, mais do que uma variante necessita ser ativada para acomodar a deformação de escorregamento. Como consequência disso, necessita-se de uma tensão muito maior para induzir a martensita. Conseguindo-se ativar apenas 1 (uma) variante da martensita, o movimento das discordâncias parciais de Shockley será facilitado, logo, a recuperação de forma também poderá ocorrer mais fácil para granulometria mais fina.

Estudando ligas inoxidáveis que apresentam recuperação de forma, conforme Tabela 1, Silva et al. (2008a; 2008b) e Silva e Otubo (2008) evidenciaram que até a temperatura de austenitização de 900°C nenhuma alteração do tamanho de grão austenítico ocorreu, mantendo-se em torno de 30µm. Visualizaram ainda um crescimento abrupto do tamanho de grão entre as temperaturas de austenitização de 900°C e 1.050°C, atingindo-se valores da ordem de 60µm. A liga que apresentava menor conteúdo de manganês e maior conteúdo de cromo foi a que apresentou menor crescimento de grão para todas as temperaturas avaliadas (de 900°C a 1.050°C). A temperatura de austenitização mostrou-se muito mais eficiente na alteração do tamanho de grão do que o tempo de austenitização.

**Tabela 1. Composição química dos lingotes utilizados no presente estudo (% peso).**

Liga	Cr	Ni	Mn	Si	C	Fe
A	9,9	4,9	10,3	5,3	0,006	Balanço
C	8,8	4,6	14,2	5,3	0,008	Balanço

Silva e Otubo (2009) constataram que tanto a dureza quanto a resistência à compressão, de uma maneira geral, tendem a diminuir com o aumento da temperatura de austenitização. Os autores evidenciaram que a liga que apresentou menor tamanho médio de grão austenítico – aquela com menor conteúdo de manganês e maior conteúdo de cromo – apresentou maiores dispersões nos resultados de dureza, o que poderia estar associado justamente ao menor tamanho dos grãos observado para esta liga.

Considerando que um tamanho de grão menor é obtido para temperaturas de austenitização menores, e que o aumento da temperatura de austenitização proporciona uma redução da dureza, e sendo a dureza diretamente relacionada à resistência ao desgaste, os resultados sugerem que estas ligas, quando submetidas a temperaturas de austenitização maiores, apresentarão maior desgaste abrasivo.

A presente pesquisa objetiva verificar a influência da composição química na resistência ao desgaste de ligas inoxidáveis Fe-Mn-Si-Cr-Ni com efeito de memória de forma, dando seguimento ao entendimento do mecanismo de desgaste abrasivo presente através de uma análise da evolução da taxa de desgaste com o tempo para cada uma das ligas estudadas. Também são correlacionados os resultados de desgaste obtidos com as temperaturas de austenitização empregadas. A análise consistiu em avaliações da superfície de desgaste através de microscópio ótico e estereomicroscópio e análise do perfil de rugosidade da superfície da amostra que foi exposta ao ensaio. Foi analisada a perda de massa do pino (amostra do material estudado) após realização do ensaio de desgaste em diferentes intervalos de teste.

Um aprofundamento no conhecimento do mecanismo de desgaste é necessário visto que qualquer uma das aplicações imaginadas para tais ligas envolve, com menor ou maior intensidade, contato físico entre partes. É natural, portanto, a existência de algum processo de desgaste. Para Otubo et al. (1997) os aços inoxidáveis com efeito de memória de forma podem ser utilizados em aplicações como junção de tubulações, conexões elétricas, atuadores elétricos e térmicos, amortecimento de vibrações. As ligas estudadas não foram submetidas a ciclos de treinamento e encontram-se no estado “temperadas em água”. Outros estudos estão sendo conduzidos para avaliar a resistência ao desgaste de materiais após serem submetidos a consecutivos ciclos de treinamento.

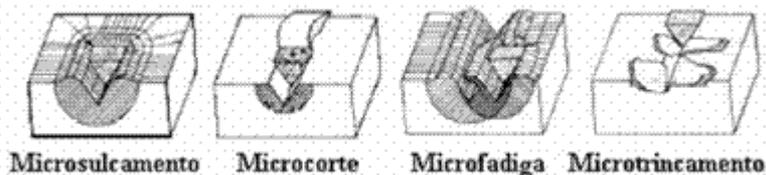
Existem duas formas básicas de ocorrência de desgaste em função de um contato entre uma partícula e um material sólido: abrasão e erosão. O desgaste por abrasão consiste na perda de material em função da passagem de uma partícula dura por uma superfície, enquanto que o desgaste por erosão é caracterizado pelo impacto localizado de um fluido contra a superfície do material. Ambos os tipos são formas rápidas e severas de desgaste e podem conduzir a perdas financeiras significativas se não forem devidamente controladas (Stachowiak e Batchelor, 2005).

A caracterização dos mecanismos de desgaste tem sido feita de acordo com as deformações observadas na superfície de desgaste das amostras nas várias condições de ensaio. Se as partículas não têm movimento em relação à superfície, mas agem como indentadores fixos, movendo através da amostra, uma série de sulcos finos e paralelos é produzida sobre a superfície da amostra. Isto leva ao desgaste por microsulcamento ou abrasão a dois corpos. Se as partículas abrasivas rolam entre as duas superfícies, múltiplas indentações, sem direcionamento evidente, são produzidas em um processo conhecido como microcorte ou abrasão por rolamento ou abrasão a três corpos (Colombo et al., 2009).

Exames microscópicos evidenciaram a existência de 4 (quatro) micromecanismos para o desgaste abrasivo, conforme ilustra a Figura 1 (Stachowiak e Batchelor, 2005; Colombo et al., 2009):

- (i) *Microsulcamento*: quando uma única partícula abrasiva entra em contato, não resultando em qualquer arrancamento de material da superfície de desgaste, ocorrendo a formação de uma rebarba à frente da partícula abrasiva, com um contínuo deslocamento lateral do material, formando, com isso, bordas adjacentes ao sulco produzido sem perda de material efetivamente devido ao deslocamento plástico do material.
- (ii) *Microcorte ou Microrrisamento*: quando as condições de desgaste não permitem grandes níveis de deformação plástica do material, ocorre a perda de massa – por lascas iguais ao volume dos sulcos de desgaste – devido ao corte do material pelo abrasivo.
- (iii) *Microfadiga*: ocorre quando um material é sulcado para o lado contínuo e repetidamente, devido à passagem de consecutivas partículas abrasivas, até que se quebre devido a algum ciclo de fadiga.

- (iv) *Microtrincamento*: ocorre quando tensões muito concentradas são impostas pelas partículas abrasivas, ou quando se está empregando um material abrasivo mais rígido/frágil, o que acarreta em fraturas na superfície de contato com posterior destacamento de fragmentos.



**Figura 1. Representação esquemática dos micromecanismos de desgaste abrasivo (Stachowiak e Batchelor, 2005; Colombo et al., 2009).**

O desgaste abrasivo pode ser classificado em dois modos principais: abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos. Utilizando-se desta definição, a amostra é o “primeiro corpo”, o contra-corpo é o “segundo-corpo” e o abrasivo é o “terceiro corpo”. Define-se que ocorre desgaste a dois corpos quando as partículas ou asperidades estão rigidamente fixadas no segundo corpo, possibilitando, assim, riscos mais profundos no primeiro corpo. Um exemplo de abrasão a dois corpos é o desgaste provocado no sistema amostra-lixo (pino contra lixa ou pino contra disco, por exemplo). No desgaste a três corpos as partículas abrasivas estão livres, o que permite o rolamento destas entre a amostra e o contra-corpo que, conseqüentemente, gastam apenas parte do tempo atuando no riscamento da superfície (roda de borracha, por exemplo).

Uma das maneiras para diminuir o desgaste é a seleção dos materiais adequados para cada aplicação. Portanto, faz-se necessário realizar ensaios que permitam avaliar a resistência ao desgaste dos materiais, e poder relacioná-la com fatores como composição, microestrutura e propriedades mecânicas (Gómez et al., 2009).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Fabricação das Ligas e Metodologia para Caracterização Metalográfica

O material de partida utilizado para o presente estudo foi elaborado em forno de indução a vácuo. Foram fabricados lingotes de dimensões preliminares 65mm x 65mm de seção transversal, sendo posteriormente aquecidos a 1.180°C e submetidos a um forjamento a quente até atingir a seção transversal de 40mm x 40mm. A composição química dos lingotes utilizados no presente estudo encontra-se na Tab. 1.

As barras obtidas foram ainda submetidas a um seccionamento longitudinal, de forma que a sua seção transversal passasse a apresentar as dimensões 20mm x 20mm, sendo novamente reaquecidas, porém a uma temperatura de 1.100°C por um período de 3.600s, e em seguida, submetida a uma nova operação de conformação para arredondamento dos cantos-vivos, conforme Otubo et al. (1994a; 1994b; 1995).

As barras de diâmetro 20mm foram então submetidas a uma seqüência de forjamento a quente seguido de forjamento a frio até atingir um diâmetro final de ~8mm. Para realizar o forjamento a quente empregou-se 1.050°C como temperatura de solubilização antes do primeiro passe e entre os passes consecutivos, sendo utilizadas as seguintes matrizes de redução (diâmetro final): 18,542mm, 16,002mm, 13,843mm, 11,938mm, 10,414mm e 9,525mm. Na seqüência foi iniciado o forjamento a frio, utilizando-se para tal as seguintes matrizes de redução (diâmetro final): 8,763mm e 7,620mm. Em nenhum dos casos empregou-se uma redução de área superior a 40%.

Em seguida as barras de 8mm de diâmetro foram submetidas a uma solubilização, por 2.400s, nas seguintes temperaturas, seguido de têmpera em água à temperatura ambiente (~30°C): 900°C e 1.050°C. Depois de finalizado o tratamento térmico, foram retiradas amostras com 13mm de comprimento, utilizando-se uma cortadeira ISOMET 1000 PRECISION SAW, fornecido pela BUEHLER (200g de carga, rotação de 100rpm) para evitar superaquecimentos e/ou danos à superfície de interesse, sendo este o material de partida para o presente estudo. Uma das faces destas amostras foi submetida a lixamento (#320 a #600) seguido de polimento mecânico (6µm, 1µm e 1/4µm).

Para revelar a microestrutura, as amostras foram submetidas a ataque químico, utilizando-se como solução o reagente *Marble* por 30s. Para caracterização, foram utilizados: microscópio ótico LEICA LMDM acoplado a um analisador de imagens (QWIN), microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6490LV e estereomicroscópio modelo MICRONAL.

### 2.2. Ensaios de Desgaste Abrasivo

Empregou-se uma máquina do tipo “pino contra lixa” para investigar o comportamento de desgaste abrasivo das ligas inoxidáveis objeto de estudo. Os testes foram realizados à temperatura ambiente (24° a 28°C), e o ensaio consistiu em manter em contato um corpo-de-prova metálico (pino estático), sem lubrificação (seco) e uma superfície abrasiva.

Cada corpo-de-prova foi pesado antes e depois do ensaio utilizando uma balança de precisão METTLER H35AR, com precisão de 0,0001g. Antes de cada pesagem foi feita a limpeza dos corpos-de-prova através de ar comprimido seco. Não foi utilizado abrasivo entre os corpos, visto que o teste consiste num ensaio a dois corpos.

Para todos os ensaios foi aplicada uma carga constante, rotação do disco de 300rpm, monitorada por um tacômetro digital e lixa de papel #320 como corpo abrasivo.

Para os testes foram utilizadas amostras das duas ligas objeto de análise após serem austenitizadas a 900° e 1.050°C. O percurso total foi de aproximadamente 1.000m para cada uma das amostras estudadas. No entanto, visando analisar a evolução da taxa de desgaste ao longo do tempo, a cada 120s (2min) o equipamento era desligado e a amostra era pesada.

Visando eliminar eventuais influências do estado (desgaste) do abrasivo da lixa, nestes intervalos, a posição da amostra sobre a lixa era alterada para que não fosse utilizada a mesma trilha de desgaste da medição anterior, o que inevitavelmente fazia com que o estado do abrasivo voltasse à condição inicial. Sendo assim, foram obtidas medições da taxa de desgaste nos após 120s (2min), 240s (4min), 360s (6min) e 600s (10min).

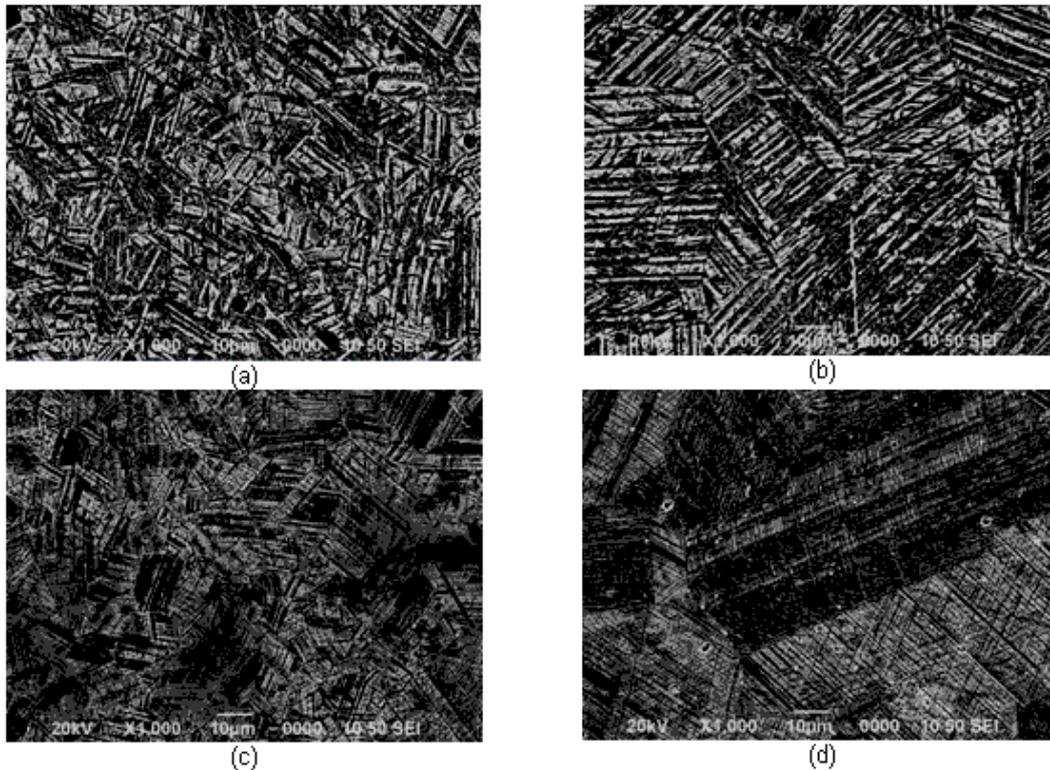
A perda de massa foi avaliada através da taxa de desgaste (mg/m), medido através da relação entre a massa perdida e a distância percorrida para cada medição feita – intervalos de desgaste de 120s.

Antes de iniciar e depois de concluir o ensaio de desgaste abrasivo, as superfícies submetidas ao contato foram analisadas através de microscópio ótico LEICA LMDM, dotado de sistema de captura de imagens, e estereomicroscópio modelo MICRONAL. Foi realizada, também, uma análise do perfil de rugosidade das amostras antes e após a realização dos ensaios, utilizando-se para tal alguns recursos do sistema de análise de imagens do microscópio ótico.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 3.1. Microestrutura

Observa-se na Figura 2 fotomicrografias das amostras das duas ligas estudadas nas diferentes temperaturas de austenitização, antes da realização do ensaio de desgaste, o que evidencia uma microestrutura heterogênea contendo maclas distribuídas dentro dos grãos austeníticos.



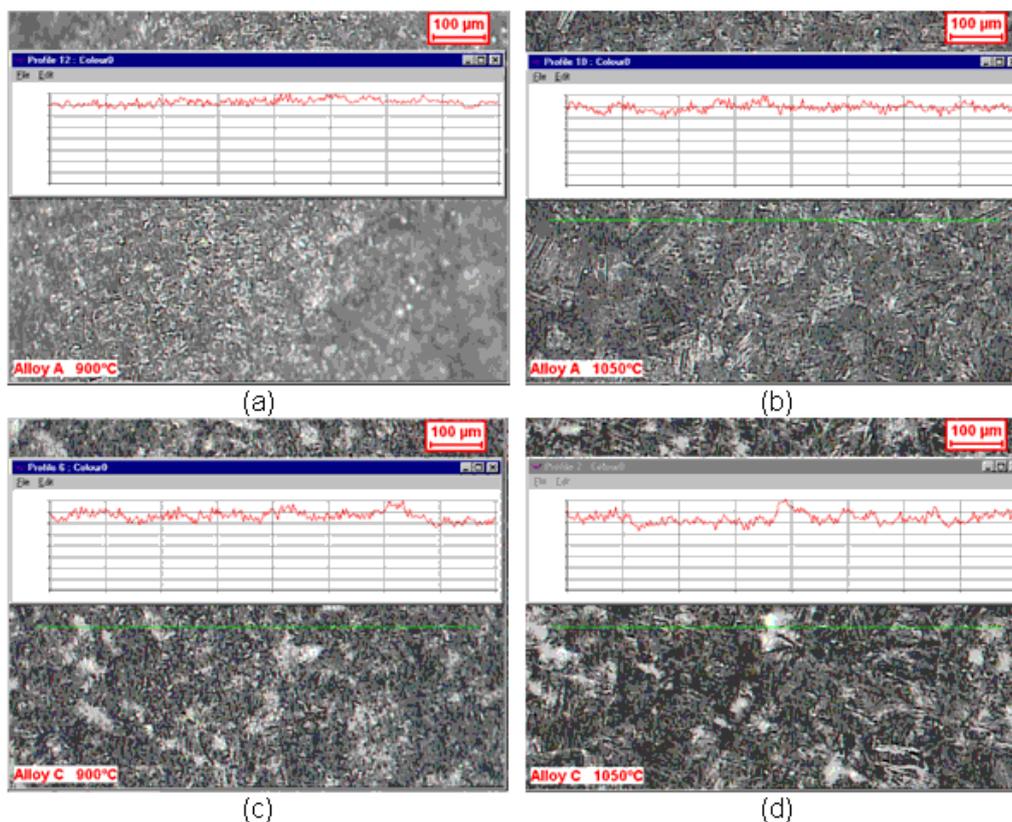
**Figura 2. Fotomicrografias típicas das superfícies das amostras submetidas ao ensaio de desgaste antes do teste: (a) Liga A, 900°C; (b) Liga A, 1.050° C; (c) Liga C, 900° C; (d) Liga C, 1.050° C. Solução de ataque: *Marble*. Microscópio eletrônico de varredura.**

Vale ressaltar também que é nítida a diferença existente no tamanho dos grãos para as amostras submetidas à austenitização em temperaturas diferentes. Para a temperatura de 1.050° C o tamanho de grão é consideravelmente superior àquele observado para a temperatura de 900° C.

Silva e Otubo (2008) e Silva et al. (2008) constataram que a utilização de diferentes temperaturas de austenitização (de 900° para 1.050° C) conduziu a um crescimento de grão austenítico da ordem de 2 (duas) vezes: de 29,4 $\mu$ m para 53,0 $\mu$ m para a liga A e de 30,2 $\mu$ m para 55,7 $\mu$ m para a liga C.

### 3.2. Superfície de Desgaste

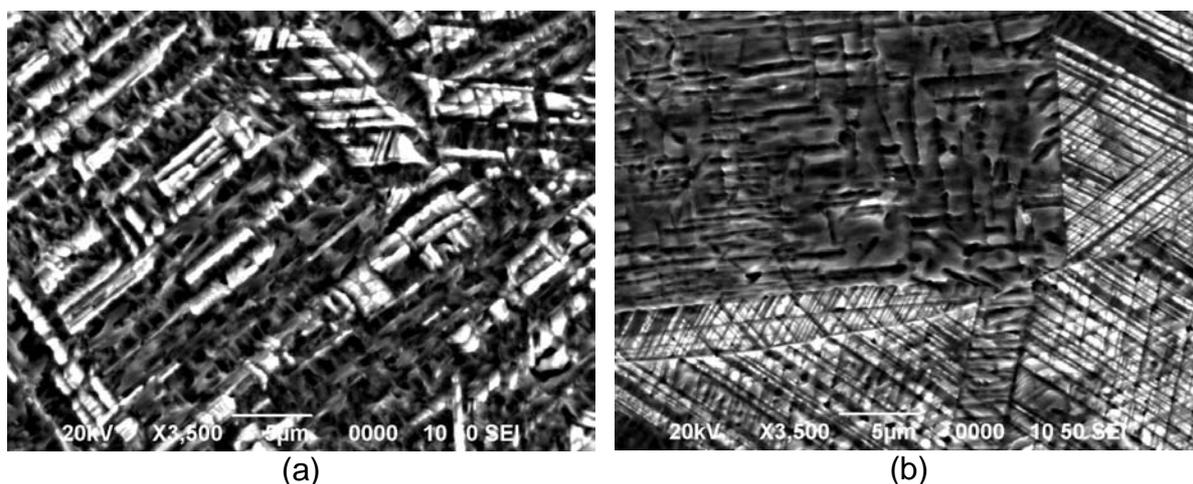
Na Figura 3 pode-se ver o perfil de rugosidade das superfícies das amostras (pinos) antes da realização do ensaio. Vale lembrar que estas superfícies foram previamente preparadas através de lixamento (lixas #320 a #600) seguido de polimento (6 $\mu$ m a 1/4 $\mu$ m) para realização de análise microestrutural. Estes perfis foram obtidos através de microscópio ótico acoplado a um analisador de imagens. Embora tenha sido utilizado o mesmo procedimento de preparação para todas as amostras, pode-se visualizar que as amostras da liga A apresentam um perfil de rugosidade mais contínuo ao longo da extensão avaliada (menos disperso). Comparando-se as diferentes temperaturas para a mesma liga, percebe-se que as amostras submetidas à temperatura de austenitização de 1.050°C apresentam uma rugosidade maior. Esta diferença entre os perfis de rugosidade devem-se à diferença de tamanho de grão existente entre os materiais.



**Figura 3. Perfil de rugosidade das superfícies das amostras antes do ensaio de desgaste: (a) Liga A, 900°C; (b) Liga A, 1.050° C; (c) Liga C, 900° C; (d) Liga C, 1.050° C. Solução de ataque: Marble. Microscópio ótico.**

A liga A sempre apresentou um menor tamanho de grão austenítico em relação à liga C, independente da temperatura de austenitização utilizada (Otubo, 2008; Silva et al., 2008). Como pode ser visto na Figura 2, existem maclas dentro dos grãos para ambas as ligas estudadas, independente da temperatura de tratamento térmico utilizada. Considerando-se a diferença existente no tamanho de grão, pode-se esperar que fosse visível alguma diferença de rugosidade entre as ligas, principalmente quando são empregadas diferentes temperaturas de austenitização.

Na Figura 4 podem ser vistas fotomicrografias típicas de amostras das ligas A e C submetidas à temperatura de austenitização de 1.050° C com ampliações de 3.500X, evidenciando a diferença de rugosidade existente entre grãos vizinhos devido à presença de maclas em alguns destes grãos e outras fases (provavelmente austenita retida) nas suas adjacências. Percebe-se que a liga A (Figura 4a) apresenta maior uniformidade no relevo, enquanto que a liga C apresenta grande variação no relevo entre grãos adjacentes, o que explica a diferença de rugosidade encontrada para as amostras, mesmo polidas.



**Figura 4. Fotomicrografias típicas das superfícies das amostras das ligas A (“a”) e C (“b”) austenitizadas a 1.050°C antes do ensaio de desgaste para evidenciar a rugosidade superficial. Solução de ataque: *Marble*. Microscópio eletrônico de varredura.**

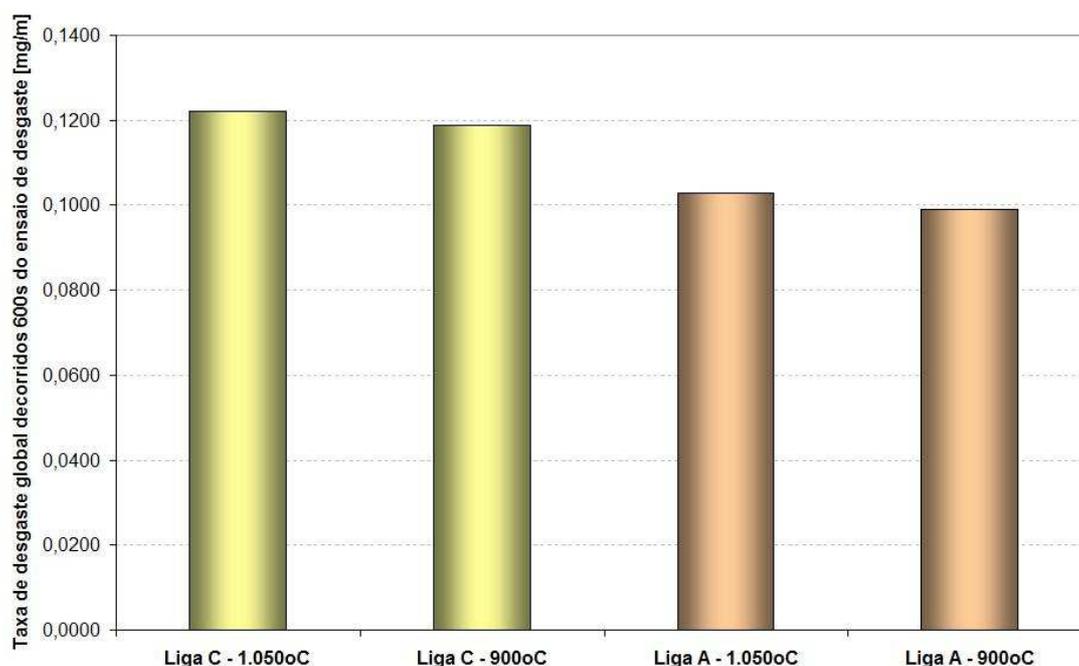
### 3.3. Taxa de Desgaste

Na Figura 5 encontram-se os resultados das taxas de desgaste para as amostras (pinos) estudadas no presente trabalho. Na legenda do gráfico, a representação “*Liga C – 1050*” indica que a liga C foi austenitizada a 1050° C.

Pode-se observar que a liga A apresentou, independente da temperatura de austenitização empregada, uma menor taxa de desgaste global (perda de massa por distância percorrida) do que a liga C. A liga A apresenta menor teor de manganês e maior conteúdo de cromo. Verifica-se que a liga C desgasta de 17,5% (0,1220 em relação a 0,1038, quando austenitizadas a 1050° C) a 18,9% (0,1185 em relação a 0,0997, quando austenitizadas a 900° C) a mais do que a liga A.

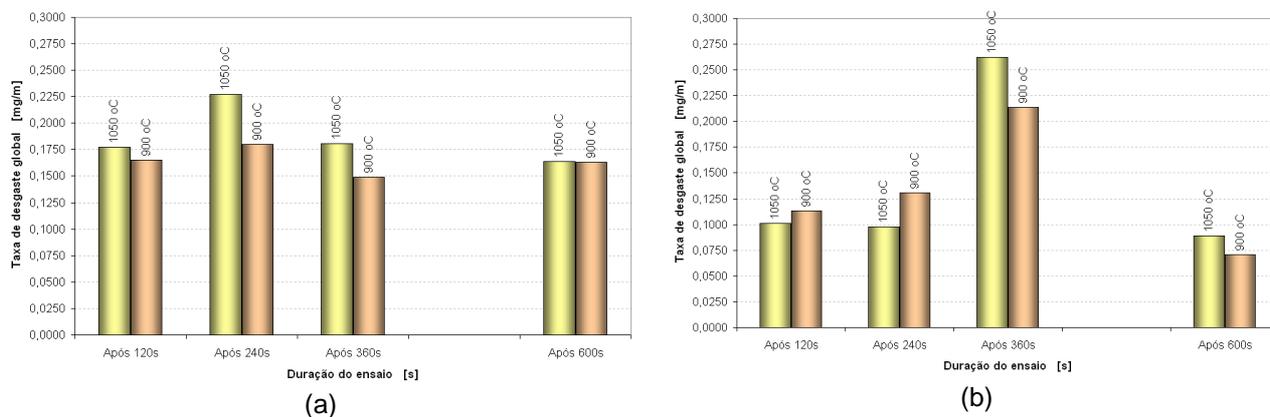
Evidenciou-se, também, que o aumento da temperatura de austenitização proporcionou um aumento da taxa de desgaste para as duas ligas estudadas. A temperatura de austenitização de 1.050° C desgasta de 4,1% (0,1220 em relação a 0,1185, para a liga C) a 3,0% (0,1038 em relação a 0,0997, para a liga A) mais do que a temperatura de austenitização de 900° C.

Percebe-se, portanto, que a composição química influencia de forma muito mais significativa o aumento da resistência ao desgaste do que a temperatura de austenitização utilizada. No entanto, consegue-se obter pequenas modificações nos resultados de resistência ao desgaste alterando a temperatura de tratamento térmico, pelo observado.



**Figura 5. Taxa de desgaste global para as duas ligas estudadas em diferentes condições de austenitização.**

Na Figura 6 encontram-se os resultados das taxas de desgaste após os sucessivos ensaios, lembrando que a cada medição, a posição da amostra na lixa foi alterada para que o pino percorresse um novo trajeto que não coincidissem com a trilha do ciclo de teste anterior, justamente para que o abrasivo da lixa do novo teste também estivesse totalmente intacto.

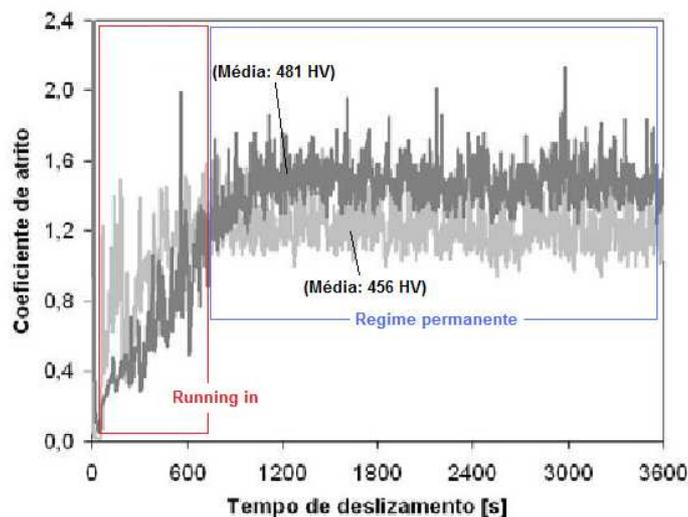


**Figura 6. Evolução da taxa de desgaste ao longo do tempo para as ligas estudadas para diferentes temperaturas de austenitização: (a) Liga A; (b) Liga C.**

Pela Figura 6 evidencia-se que ambas as ligas estudadas apresentaram um aumento da taxa de desgaste nos primeiros minutos de ensaio, vindo a apresentar uma queda em seguida.

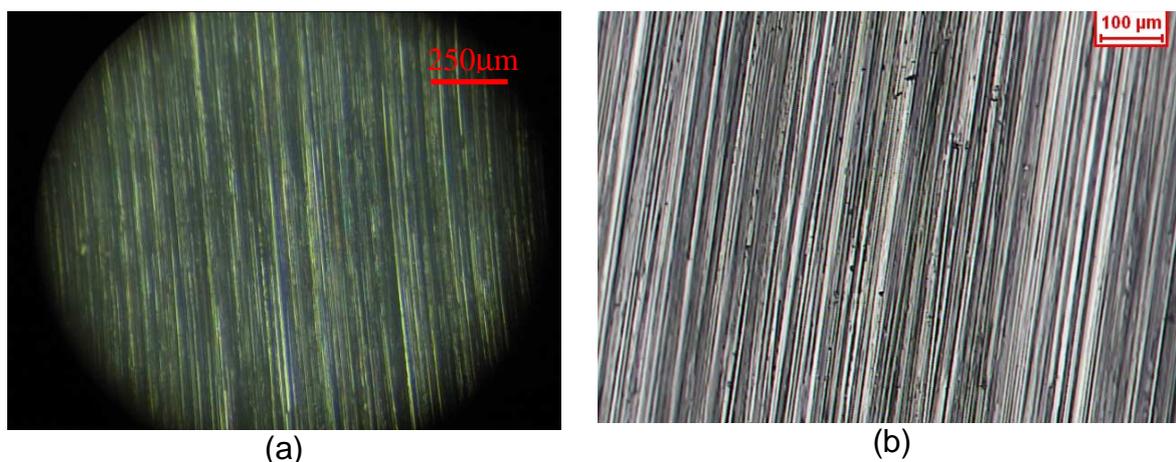
Embora não tenham sido monitoradas as forças tangenciais e normais ao longo do teste, o que poderia trazer como informação o “coeficiente de atrito” destes materiais, pode ser feita uma correlação destes resultados com os dados apresentados por Viáfara e Sinátora (2008). Nas curvas de atrito levantadas para o aço estudado por Viáfara e Sinátora (2008) é visível a presença de um período de amaciamento (*running in*) e de um regime aproximadamente permanente a partir de certo instante. Analisando as duas regiões das curvas de atrito, percebe-se que no período de *running in* existe um aumento considerável no coeficiente de atrito inclusive com grandes variações/dispersões nos seus valores, mas que quando se atinge certo tempo de ensaio, o coeficiente de atrito tende a cair estabilizando-se de certa forma. Na Figura 7 encontra-se um exemplo de uma curva de coeficiente de atrito apresentado por Viáfara e Sinátora (2008) para dois materiais com durezas diferentes. Pela curva do coeficiente de atrito da Figura 7 percebe-se também que o material que apresentou maior dureza apresentou maior coeficiente de atrito.

Analisando os resultados obtidos no presente trabalho verifica-se que os resultados da taxa de desgaste aumentam inicialmente, mas tendem a cair a partir de certo tempo. Ensaios adicionais devem ser feitos para intervalos de tempo superiores aos 600s para avaliar se a taxa de desgaste se mantém, justamente para seguir com este comparativo. No entanto, pelos resultados preliminares obtidos, pode-se inferir que este material também apresenta um período de *running in*, porém com duração consideravelmente inferior ao observado por Viáfara e Sinátora (2008).



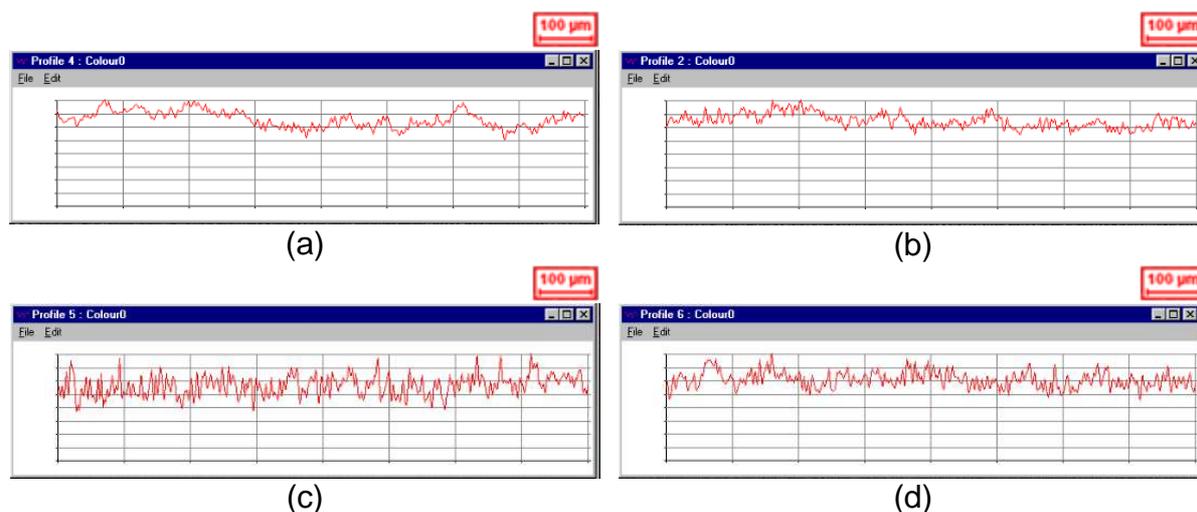
**Figura 7. Exemplo de curva de variação do coeficiente de atrito de aço mostrando os períodos de *running in* e sua estabilização. Adaptado de Viáfara e Sinátora (2008).**

Na Figura 8 são apresentadas as imagens típicas das superfícies desgastadas dos pinos após realização do ensaio, obtidas através de estereomicroscópio (Figura 8a) e microscópio ótico (Figura 8b). O aspecto da superfície, independente da liga ou da temperatura de austenitização utilizada, é o mesmo e exibe as trilhas típicas da interação entre o abrasivo utilizado (lixa #320) e o pino.



**Figura 8. Imagens típicas das superfícies desgastadas após realização do ensaio de desgaste: (a) Estereomicroscópio, 4X ampliação; (b) Microscópio ótico, 10X.**

Na Figura 9 são apresentados os perfis de rugosidade obtidos através do microscópio ótico acoplado a um analisador de imagens. O perfil de rugosidade obtido sugere que a rugosidade das superfícies é mais uniforme para a liga A do que para a liga C após o término do ensaio, independente da temperatura de austenitização. Analisando-se o perfil de rugosidade da liga A (Figura 9a e Figura 9b), percebe-se que a altura entre os picos e vales é menor do que para a liga C (Figura 9c e Figura 9d). Esta maior homogeneidade de desgaste para a liga A do que para a liga C pode ser explicada pelo fato da liga A apresentar um tamanho de grão menor, o que inevitavelmente conduz a uma maior homogeneidade da microestrutura. Basta analisar comparativamente as fotomicrografias da Fig. 5.



**Figura 9. Perfil de rugosidade das superfícies desgastadas após realização do ensaio de desgaste: (a) Liga A, 900° C; (b) Liga A, 1.050° C; (c) Liga C, 900° C; (d) Liga D, 1.050° C. Microscópio ótico, 10X.**

Observa-se a ocorrência de alguns pontos de arrancamento de partículas para as duas ligas estudadas, independente da temperatura de austenitização utilizada. No entanto, o mecanismo de microdesgaste abrasivo predominante ainda é o microcorte ou microrriscação, classificação esta baseada na Fig. 1.

#### 4. CONCLUSÃO

O micromecanismo de desgaste abrasivo dominante para as ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma estudadas é o microcorte ou microrriscação.

Observou-se que a liga com menor teor de manganês e maior teor de cromo apresentou menor taxa de desgaste (entre 17,5% e 18,9%) independente da temperatura de austenitização utilizada.

Em termos de tratamento térmico, o aumento da temperatura de austenitização de 900° para 1050°C proporcionou um aumento da taxa de desgaste de 4,1% para a liga com menos cromo e mais manganês e 3,0% para a liga com mais cromo e menos manganês.

A composição química influencia de forma muito mais significativa o aumento da resistência ao desgaste do que a temperatura de austenitização.

As duas ligas estudadas apresentam um aumento da taxa de desgaste nos primeiros minutos do ensaio, vindo a apresentar uma queda a partir de certo tempo, o que sugere que existe uma tendência à estabilização para uma duração de ensaio maior.

## 5. REFERÊNCIAS

- Bergeon, N., Kajiwara, S., Kikuchi, T., 2000, "Atomic force microscope study of stress-induced martensite formation and its reverse transformation in a thermomechanically treated Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloy", *Acta Materialia*, v.48, n.16, pp.4053-4064.
- Colombo, B.M., Larosa, M.A., Pinto, M.A., 2009, "Influência dos meios de resfriamento na estrutura e resistência ao desgaste de um aço baixa-liga fundido", In: 64° Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, MG.
- Gómez, A.G., Franco, E.E., Sinátoro, A., 2009, "Projeto e construção de um abrasômetro para realização de ensaios de desgaste abrasivo a quente", In: 64° Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, MG.
- Jee, K. K., Han, J. H., Jang, W. Y., "Measurement of volume fraction of  $\square$  martensite in Fe-Mn based alloys", 2004, *Materials Science and Engineering A* 378, pp.319-322.
- Kajiwara, S., 1999, "Characteristic features of shape memory effect and related transformation behavior in Fe-based alloys", *Materials Science and Engineering A* 273-275, pp.67-88.
- Otubo, J., Mei, P.R., Koshimizu, S., 1994, "Caracterização de aços inoxidáveis com efeito de memória de forma", In: 11° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, Águas de São Pedro, SP, pp.219-222.
- Otubo, J., Mei, P. R. m Koshimizu, S., 1994, "Desenvolvimento de novos aços inoxidáveis com efeito de memória de forma", In: IV Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável – INOX'94, São Paulo, SP.
- Otubo, J., Mei, P.R., Koshimizu, S., 1995, "Desenvolvimento de aços inoxidáveis com efeito de memória de forma", In: 50° Congresso Anual da ABM, São Pedro, SP, pp.15-27.
- Otubo, J., Mei, P. R., Koshimizu, S., 1997, "Materiais com efeito de memória de forma: características principais e possíveis aplicações", In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM, Bauru, SP.
- Otubo, J., Nascimento, F. C., Mei, P. R., Cardoso, L. P., Kaufman, M. J., 2002, "Influence of austenite grain size on mechanical properties of stainless SMA", *Materials Transactions*, v.43, n.5, pp.916-919.
- Otubo, J., Mei, P. R., Lima, N. B., Serna, M. M., Gallego, E., 2007, "O efeito do tamanho de grão austenítico no número de orientações das variantes de martensita em ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma", *Revista Escola de Minas*, pp.129-134.
- Silva, C.E., Júnior, A.R., Otubo, J., 2008, "The influence of austenitizing temperature and chemical composition on the microstructure of stainless shape memory steel", In: 18° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, Porto de Galinhas, PE, pp.5875-5882.
- Silva, C. E., Otubo, J., 2008, "Influência da temperatura de solubilização no tamanho de grão austenítico de ligas à base de Fe-Mn-Si com efeito de memória de forma: resultados preliminares", In: 63° Congresso Anual da ABM, Santos, SP, pp.2613-2621.
- Silva, C.E., Otubo, J., Júnior, A.R., 2008, "A influência do tempo e temperatura de austenitização e da composição química na microestrutura de ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma", In: IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável – INOX'2008, São Paulo, SP, pp.42-48.
- Silva, C.E., Otubo, J., 2009, "Influência da temperatura de austenitização na dureza, resistência à compressão e capacidade de recuperação de forma de ligas inoxidáveis", In: 64° Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, MG.
- Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W., 2005, "Engineering tribology", Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Viáfara, C.C., Sinátoro, A., 2008, "Efeito da dureza sobre a transição nos regimes de desgaste por deslizamento dos aços", In: 18° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, Porto de Galinhas, PE, pp.6939-6950.
- Wen, Y. H., Yan, M., Li, N., 2004, "Remarkable improvement of shape memory effect in Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C alloy by ageing with deformation", *Scripta Materialia*, 50, pp.835-838.

## 6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## CHARACTERIZATION OF ABRASIVE WEAR MECHANISM OF “Fe-Mn-Si-Cr-Ni” STAINLESS SHAPE MEMORY STEEL – Part 2: INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION AND WEAR RESISTANCE EVOLUTION

Christian Egidio da Silva, [christianegidio@gmail.com](mailto:christianegidio@gmail.com)<sup>1,2</sup>  
Jorge Otubo, [jotubo@ita.br](mailto:jotubo@ita.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 12.228-900, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>2</sup>Gerdau Aços Especiais, 12.442-260, Pindamonhangaba, SP, Brasil

**Abstract:** *It was analysed the influence of chemical composition for different austenitizing temperature on the wear behavior of two stainless steel which present shape memory effect. It was used a pin-on-disk device to understand the wear mechanism involved. They were tested pin with the following chemical composition: Fe-10.3Mn-5.3Si-9.9Cr-4.9Ni-0.006C and Fe-14.2Mn-5.3Si-8.8Cr-4.6Ni-0.008C after being austenitized at 950° and 1050°C followed by water tempering. The surface characterization was performed by optical microscopy and roughness profile evaluation were conducted. It was measured the weight loss after conduction the wear testing and the wear rates were estimated. The results showed that the alloy with less manganese and high chromium content presents the better wear resistance (around 17,5% and 18.9%). An increase on the austenitizing temperature conducted to a slight decrease on the wear resistance (around 3.0% and 4.1%) . The chemical composition presents higher influence on the wear behavior than the austenitizing temperature.*

**Key-words:** *wear, stainless steel, Fe-Mn-Si-Cr-Ni, shape memory effect, chemical composition*