

## **CARACTERIZAÇÃO DO MECANISMO DE DESGASTE ABRASIVO PRESENTE EM LIGAS INOXIDÁVEIS Fe-Mn-Si-Cr-Ni COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA – Parte 1: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO**

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

**Resumo:** Foi analisado o comportamento de desgaste por deslizamento em dois aços inoxidáveis que apresentaram efeito de memória de forma usando ensaio tribológico do tipo pino-contra-lix. Foram ensaiados pinos com duas composições químicas distintas após serem submetidos a austenitização nas temperaturas de 900° e 1.050°C, seguidos de resfriamento forçado em água na temperatura ambiente. A caracterização das superfícies desgastadas foi feita por meio de observações em microscópio eletrônico de varredura, microscópio ótico e estereomicroscópio, sendo conduzida também uma avaliação do perfil de rugosidade das superfícies antes e após o ensaio. Foi avaliada a perda de massa e respectivas taxas de desgaste globais após a realização do ensaio. Os resultados revelaram que o aumento da temperatura de austenitização proporcionou um ligeiro incremento da taxa de desgaste para os dois materiais avaliados – entre 2% e 3% quando a temperatura é alterada de 900°C para 1.050°C. 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, austenitização

### **1. INTRODUÇÃO**

#### **1.1. Histórico do Desenvolvimento de Ligas Inoxidáveis com Efeito de Memória de Forma**

Ao longo da década de 80 foi verificado que ligas à base de Ferro exibiam o efeito de memória de forma sob certas condições. Podem ser citadas como exemplo as seguintes ligas: ferro-platina, ferro-paládio, ferro-níquel-cobalto-titânio, ferro-manganês-silício, ferro-manganês-cromo-níquel, entre outras combinações (Otubo et al., 1994a; Kajiwara, 1999).

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 capacidade de conformação e trabalho, 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 torna-se bastante complicado, encarecendo sua fabricação (Otubo et al., 1997; Kajiwara, 1999; Wen et al., 2004; Jee et al., 2004).

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 pouquíssimos estudos têm avaliado a influência do tamanho de grão austenítico e orientações cristalográficas na capacidade de recuperação de forma de certos aços inoxidáveis.

#### **1.2. Influência da Temperatura de Austenitização no Tamanho de Grão, Dureza e na Resistência à Compressão**

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 facilmente para uma granulometria mais fina.

Estudando 3 ligas inoxidáveis que apresentam recuperação de forma, Silva et al. (2008a; 2008b) e Silva e Otubo (2008) evidenciaram que até a temperatura de austenitização de 900°C nenhuma alteração significativa 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 (entre 900°C e 1.050°C). A temperatura de austenitização mostrou-se muito mais eficiente na alteração do tamanho de grão do que o tempo de austenitização.

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 o material submetido a uma temperatura de austenitização maior apresentará uma taxa de desgaste maior.

Através da presente pesquisa, objetiva-se iniciar o entendimento do mecanismo de desgaste abrasivo presente em ligas inoxidáveis Fe-Mn-Si-Cr-Ni com efeito de memória de forma, correlacionando os resultados de desgaste obtidos com as temperaturas de austenitização empregadas. Esta preocupação deve existir visto que quaisquer das aplicações propostas para estas ligas envolvem, com menor ou maior intensidade, contato físico entre partes. É natural, portanto, a existência de algum processo de desgaste. De acordo com 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 e amortecimento de vibrações. As ligas estudadas não foram submetidas a ciclos de treinamento.

### 1.3. Mecanismos de Desgaste Abrasivo

De acordo com Stachowiak e Batchelor (2005) 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.

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 sua superfície. 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. O mecanismo de desgaste dominante no ensaio depende das características da amostra, da carga aplicada, fração volumétrica de abrasivo na suspensão, material abrasivo, condições da superfície da amostra (Colombo et al., 2009).

De acordo com Stachowiak e Batchelor (2005) e Colombo et al. (2009), existem 4 (quatro) micromecanismos para o desgaste abrasivo, conforme ilustra a Figura 1: (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 contínua 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.

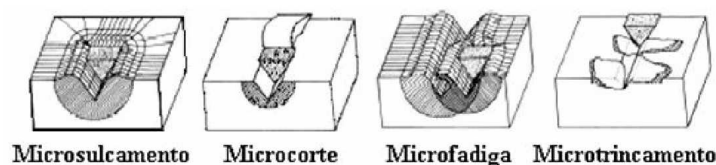


Figura 1. Representação esquemática dos micromecanismos de desgaste abrasivo (Stachowiak e Batchelor, 2005; Colombo et al., 2009).

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 asperezas 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).

Desde os primeiros estudos conduzidos acerca dos regimes de desgaste, tem-se observado que pequenas variações nas condições do sistema tribológico podem resultar em transições entre os regimes de desgaste, de moderado para severo, e vice-versa. Estas transições podem ser observadas quando são aplicados níveis de cargas normais diferentes, distintas velocidades de deslizamento, temperaturas atmosféricas, rugosidades superficiais e dureza dos materiais (Viáfara e Sinatora, 2008).

Neste trabalho, é apresentada uma análise do efeito da variação da temperatura de austentização de duas ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma no processo de desgaste. A análise consistiu em avaliações da superfície de desgaste através de microscópio eletrônico de varredura, microscópio ótico e estereomicroscópio e análise do perfil de rugosidade da superfície da amostra que foi exposta ao ensaio. Adicionalmente, foi analisada a perda de massa do pino (amostra do material estudado) após realização do ensaio de desgaste, para que ela fosse possível efetuar comparação entre ligas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Fabricação das Ligas e 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  $65 \times 65 \text{mm}^2$  de seção transversal, sendo posteriormente aquecidos a  $1.180^\circ\text{C}$  e submetidos a um forjamento a quente até atingir a seção transversal de  $40 \times 40 \text{mm}^2$ . A composição química dos lingotes utilizados no presente estudo encontra-se na Tabela 1.

**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

As barras obtidas foram ainda submetidas a um seccionamento longitudinal, de forma que a sua seção transversal passasse a apresentar as dimensões  $20 \times 20 \text{mm}^2$ , sendo novamente reaquecidas, porém a uma temperatura de  $1.100^\circ\text{C}$  por um período de 3.600s, e em seguida, submetida a uma nova operação de conformação para arredondamento dos cantos-vivos (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  $1.050^\circ\text{C}$  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 ( $\sim 30^\circ\text{C}$ ):  $900^\circ\text{C}$  e  $1.050^\circ\text{C}$ . Depois de finalizado o tratamento térmico, foram retiradas amostras com 13mm de comprimento, utilizando-se uma cortadeira ISOMET 1000 PRECISION SAW, fornecida 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 ( $6\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$  e  $1/4\mu\text{m}$ ).

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. 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 a carga aplicada foi mantida constante, rotação do disco de 300rpm monitorada por um tacômetro digital, lixa de papel #320 como corpo abrasivo.

Para os testes foram utilizadas amostras das duas ligas objeto de análise após serem austenitizadas a 900°C 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. 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 de duas maneiras: (i) variação percentual, relação entre a massa após o equipamento ser desligado e a massa inicial antes de iniciar o teste; (ii) taxa de desgaste, medida através da relação entre a massa perdida e a distância percorrida (mg/m).

Antes de iniciar e depois de concluir o ensaio de desgaste abrasivo, as superfícies submetidas ao contato foram analisadas. 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.

Na Tabela 2 podem ser encontrados os valores típicos de dureza (micro-indentação) de cada uma das condições estudadas no presente trabalho (Silva e Otubo, 2009).

**Tabela 2. Valores de dureza típicos dos materiais submetidos ao ensaio de desgaste (Silva e Otubo, 2009).**

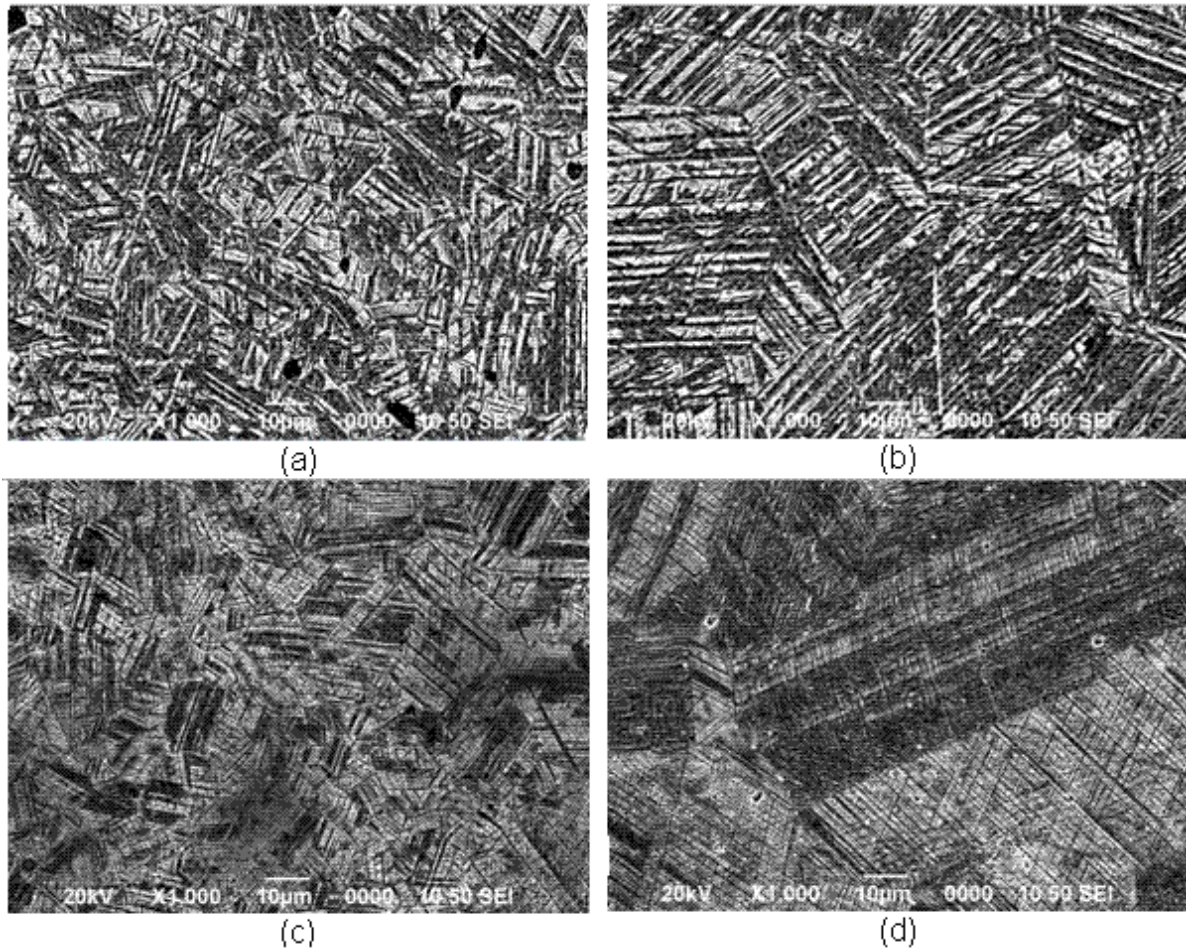
Liga	Austenitizada a 900° C [HV 0,49N]	Austenitizada a 1.050° C [HV 0,49N]
A	225	175
C	275	225

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 3.1. Microestrutura

Na Figura 2 são apresentadas fotomicrografias das amostras antes da realização do ensaio de desgaste evidenciando a microestrutura típica dos materiais estudados.

Observa-se em todas as fotos uma microestrutura heterogênea contendo maclas distribuídas dentro dos grãos austeníticos. 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. Conforme Silva e Otubo (2009), o menor tamanho de grão austenítico observado para a liga A ocasionou uma maior dispersão nos resultados de dureza para esta liga em comparação com a liga C.



**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.**

### 3.2. Superfície de Desgaste

Na Figura 3 encontram-se os perfis 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 ( $6\mu\text{m}$  a  $1/4\mu\text{m}$ ) 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. Comparando as diferentes temperaturas para a mesma liga percebe-se que as amostras submetidas à temperatura de austenitização de  $1.050^\circ\text{C}$  apresentam uma rugosidade maior.

Estas observações certamente são conseqüência da diferença de tamanho de grão existente entre os materiais. Silva e Otubo (2008) e Silva et al. (2008) constataram que a utilização de diferentes temperaturas de austenitização (de  $900^\circ$  para  $1.050^\circ\text{C}$ ) conduziu a um crescimento de grão austenítico da ordem de 2 (duas) vezes: de  $29,4\mu\text{m}$  para  $53,0\mu\text{m}$  para a liga A e de  $30,2\mu\text{m}$  para  $55,7\mu\text{m}$  para a liga C. A liga A sempre apresentou um menor tamanho de grão austenítico em relação à liga C, independente da temperatura de austenitização utilizada. 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.

Otubo et al. (2007), estudando duas ligas inoxidáveis semelhantes e que também apresentam efeito de memória de forma ( $\text{Fe-9Cr-5Ni-14Mn-5,5Si}$  e  $\text{Fe-13Cr-6Ni-8Mn-5,5Si-12Co}$ ), constataram que dentro de um mesmo grão, quando ocorre, a transformação martensítica geralmente é completa e inclusive com a variante apresentando uma única orientação para material com granulometria fina, enquanto aquela com granulometria grosseira, quando se transforma, aparecem várias variantes e as mesmas muitas vezes são truncadas não alcançando o contorno de grão. Na Figura 4 encontram-se as imagens de elétrons retroespalhados para duas situações de tamanho de grão,  $60\mu\text{m}$  e  $180\mu\text{m}$ .

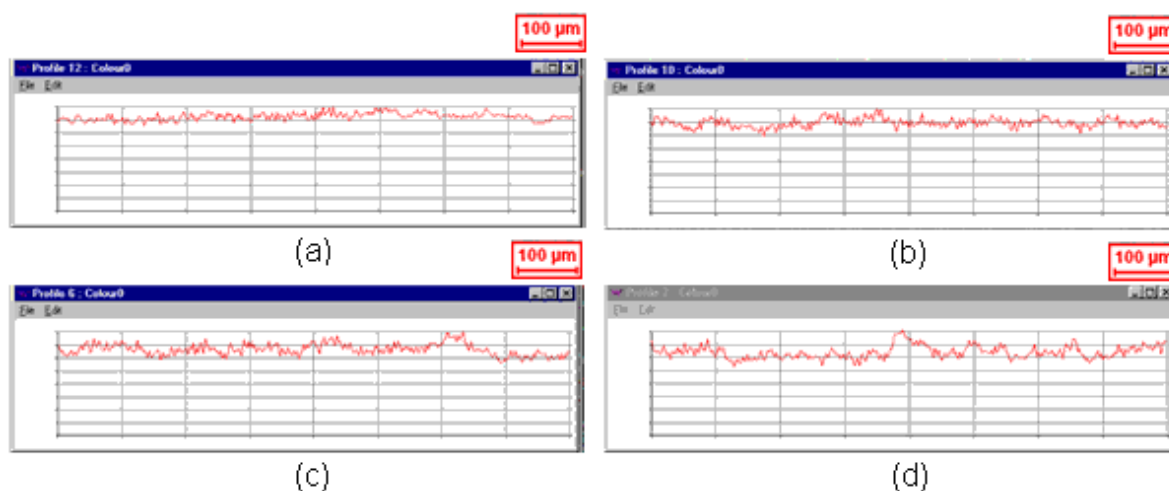


Figura 3. Perfil de rugosidade das superfícies das amostras antes do ensaio de desgaste: (a) Liga A, 900°C; (b) Liga A, 1.050° C; (c) Liga C, 900° C; (d) Liga C, 1.050° C. Microscópio ótico.

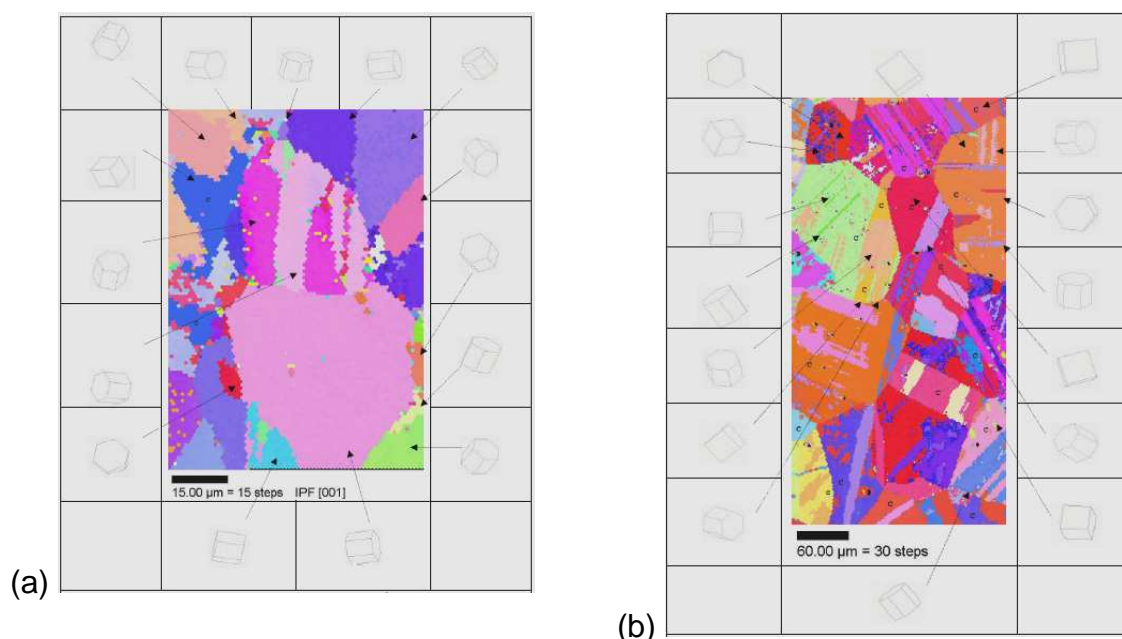


Figura 4. Imagens de elétrons retroespalhados de ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma evidenciando as diferentes orientações cristalográficas para um mesmo grão, após austenitização a 1.050° C: (a) Fe-9Cr-5Ni-14Mn-5,5Si, TGA=60µm; (b) Fe-13Cr-6Ni-8Mn-5,5Si-12Co, TGA=180µm. (Otubo et al., 2007)

Em função do exposto por Otubo et al. (2007), devido à maior diversificação de variantes cristalográficas de martensita dentro de um mesmo grão, o que pode ser comprovado pelas inúmeras maclas e suas diversificadas orientações conforme Figura 2, a diferença de rugosidade encontrada se justifica e o comportamento visualizado para as duas ligas estudadas nas diferentes temperaturas de austenitização seria esperado. Na Figura 5 podem ser vistas fotomicrografias típicas de amostras das ligas A e C submetidas à temperatura de austenitização de 1.050° C em diferentes ampliações (600X e 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.

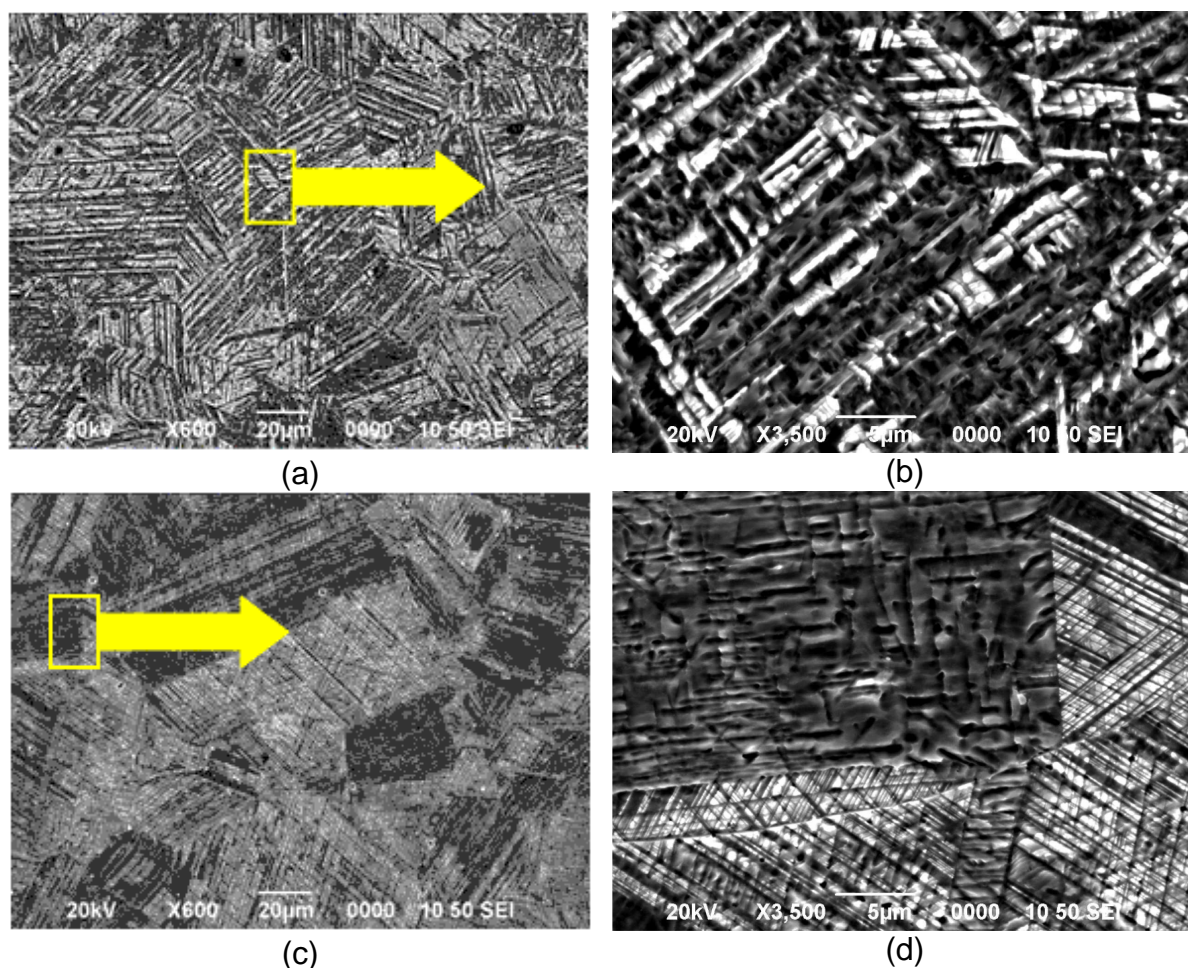


Figura 5. Fotomicrografias típicas das superfícies das amostras das ligas austenitizadas a 1.050°C antes do ensaio de desgaste. Figuras 5a (600X) e 5b (3.500X) referem-se à liga A e Figuras 5c (600X) e 5d (3.500X) referem-se à liga C. Solução de ataque: *Marble*. Microscópio eletrônico de varredura.

### 3.3. Perda de Massa e Taxa de Desgaste

Na Figura 6 encontram-se os resultados de perda de massa e taxa de desgaste para as amostras (pinos) estudadas.

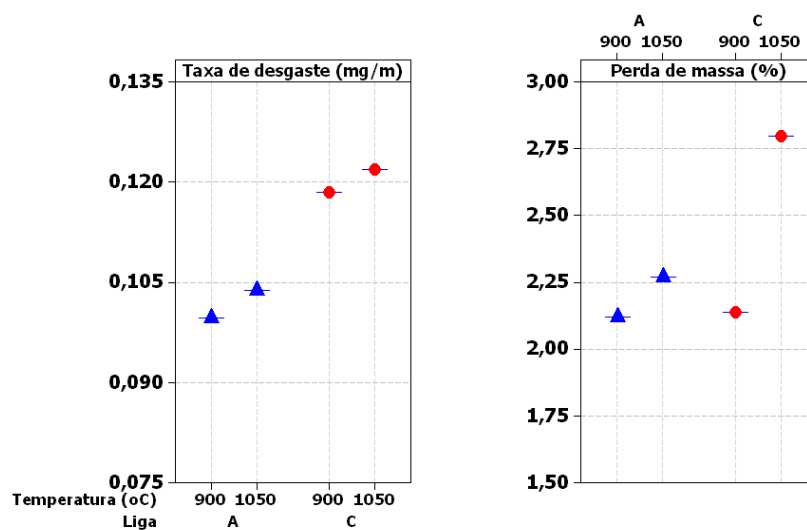


Figura 6. Resultados da taxa de desgaste global (mg/m) e perda de massa (%) para as amostras objeto de estudo.

Pode-se observar que a liga A apresentou, independente da temperatura de austenitização empregada, uma menor taxa de desgaste (perda de massa por distância percorrida) do que a liga C. Conforme Tabela 1, a liga A apresenta menor teor de manganês e maior conteúdo de cromo. Fazendo-se uma relação entre os teores de desgaste das amostras da liga C e da liga A, verifica-se que a liga C desgasta de 17,5% (0,1220 em relação a 0,1038) a 18,9% (0,1185 em relação a 0,0997) a mais do que a liga A. Pela Tabela 2, poderia ser esperado o contrário, visto que a liga A apresentou um nível médio de dureza inferior àquele observado para a liga C nas duas temperaturas ensaiadas.

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) a 3,0% (0,1038 em relação a 0,0997) mais do que a temperatura de austenitização de 900° C. Pela Tabela 2, percebe-se que o nível médio de dureza tende a cair quando a temperatura de austenitização aumenta, o que faz sentido.

Pelos resultados apresentados, percebe-se que a composição química influencia de forma muito mais significativa o aumento da resistência ao desgaste do que o tamanho médio de grão austenítico (proporcionado pelo uso de diferentes temperaturas de austenitização).

Na Figura 7 são apresentadas imagens típicas das superfícies desgastadas dos pinos após realização do ensaio e perfil de rugosidade obtido através do microscópio ótico acoplado a um analisador de imagens. Analisando apenas as imagens, parece não existir diferença significativa entre os processos de desgaste para os ensaios realizados. As superfícies exibem trilhas típicas da interação entre o abrasivo utilizado e o pino.

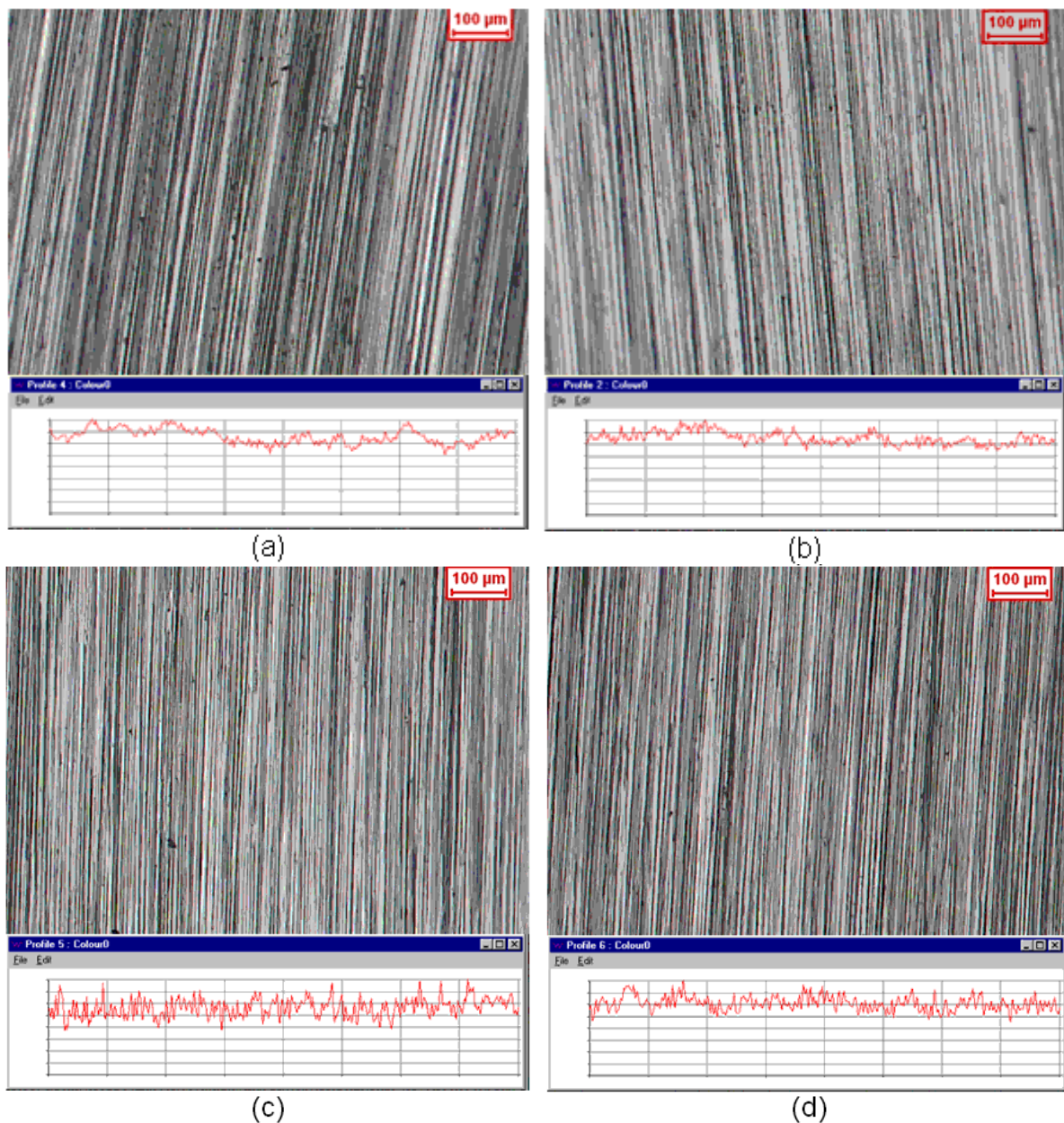


Figura 7. Imagens típicas das superfícies desgastadas e respectivos perfis de rugosidade: (a) Liga A, 900° C; (b) Liga A, 1.050° C; (c) Liga C, 900° C; (d) Liga D, 1.050° C. Microscópio ótico.



No entanto, 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 (Figuras 7a e 7b), percebe-se que a altura entre os picos e vales é menor do que para a liga C (Figuras 7c e 7d). A maior homogeneidade de desgaste para a liga A em relação à 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. Sendo mais homogênea, espera-se, também, que os arrancamentos ocorram com menor intensidade para a liga A.

É nítida a diferença de rugosidade visualizada após o ensaio de desgaste (Figura 7) em relação à situação inicial antes de iniciar o ensaio (Figura 3). O que chama atenção é que o perfil de rugosidade após a realização de teste não evidencia qualquer influência da temperatura de austenitização, mas vale reforçar que a influência da temperatura de austenitização não se mostrou tão expressiva quanto à influência da composição química. Merece atenção o fato da dureza da liga A ser menor do que a dureza da liga C e mesmo assim a taxa de desgaste da liga C ser maior do que a liga A.

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

#### 4. CONCLUSÃO

Os exames microscópicos evidenciaram que o micromecanismo de desgaste abrasivo dominante para ambas as ligas estudadas, independente da temperatura de teste utilizada, é o microcorte ou microrriscamento. Evidencia-se, no entanto, a ocorrência de alguns arrancamentos pontuais (microtrincamentos).

O aumento da temperatura de austenitização proporcionou um ligeiro incremento da taxa de desgaste para os dois materiais avaliados quando a temperatura é alterada de 900°C para 1.050°C.

A liga com menor teor de manganês e maior teor de cromo apresentou menor taxa de desgaste independente da temperatura de austenitização utilizada.

A composição química influencia de forma muito mais significativa o aumento da resistência ao desgaste do que a temperatura de austenitização. Uma mudança de composição química proporcionou um aumento da resistência ao desgaste entre 17,5% e 18,9%, ao passo que um aumento da temperatura de austenitização proporcionou aumento da resistência ao desgaste entre 3,0% e 4,1%.

#### 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: 64º 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: 64º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, MG.
- Jee, K. K., Han, J. H., Jang, W. Y., "Measurement of volume fraction of  $\epsilon$  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.
- Nascimento, F.C., Bueno, J.C., Lepiensi, C.M., Otubo, J.; Mei, P.R., 2008, "Determinação das propriedades mecânicas da martensita  $\epsilon$  por indentação instrumentada em ligas inoxidáveis com memória de forma", In: IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável – INOX'2008, São Paulo, SP. pp.65-71.
- Otubo, J., Mei, P.R., Koshimizu, S., 1994, "Caracterização de aços inoxidáveis com efeito de memória de forma", In: 11º 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: 50º 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: 18º 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: 63º 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: 64º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, MG.
- Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W., 2005, "Engineering tribology", Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Viáfara, C.C., Sinátora, A., 2008, "Efeito da dureza sobre a transição nos regimes de desgaste por deslizamento dos aços", In: 18º 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 1: INFLUENCE OF AUSTENITIZING TEMPERATURE

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 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 different chemical compositions after being austenitized at 900° and 1050°C followed by water tempering. The surface characterization was performed by SEM, optical microscopy and stereomicroscopy 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 wear rate increased with the increase of austenitizing temperature – between 2% and 3% when the temperature is chanced from 900°C to 1050°C. 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, austenitizing*