



**SINERGISMO ENTRE “NÍVEL DE CONCENTRAÇÃO”, “TIPO DE PARTÍCULA MICRO-ABRASIVA” E “TIPO LÍQUIDO” DE LAMAS MICRO-ABRASIVAS NO COMPORTAMENTO AO DESGASTE MICRO-ABRASIVO DA LIGA INTERMETÁLICA Fe-30Al-6Cr (at.%) – PARTE I: MODOS DE DESGASTE MICRO-ABRASIVOS**

Angel Felipe Magnossão de Paula<sup>a</sup>, Doris Feijó Leão Borges<sup>b</sup>, Marcelo de Matos Macedo<sup>c</sup>, Samuel Monteiro Júnior<sup>d</sup>, Gleisa Pitareli<sup>e</sup>, Muradiye Şahin<sup>f</sup>, Vikas Verma<sup>g</sup>, Bader Shafaqa Al-Anzi<sup>h</sup>, Carlos Roberto Luna-Domínguez<sup>i</sup>, Jorge Humberto Luna-Domínguez<sup>i</sup>, Cláudio Geraldo Schön<sup>j</sup>, Ronaldo Câmara Cozza<sup>e,\*</sup>

<sup>a</sup> *Universitat Politècnica de València  
Pattern Recognition and Human Language Technology – PRHLT Research Center*

<sup>b</sup> *IFES – Instituto Federal do Espírito Santo  
Coordenadoria de Mecânica – Campus Vitória*

<sup>c</sup> *UFABC – Universidade Federal do ABC  
Departamento de Engenharia de Materiais*

<sup>d</sup> *FMU – Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas  
Departamento de Engenharia Mecânica*

<sup>e</sup> *CEETEPS – Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”  
Faculdade de Tecnologia de Mauá – FATEC-Mauá, Departamento de Fabricação Mecânica*

<sup>f</sup> *Kırşehir Ahi Evran University  
Department of Chemistry, Turkey*

<sup>g</sup> *Aqila Technologies and Integration Solutions Private Limited  
Department of Aerospace Design & Operations – India*

<sup>h</sup> *Kuwait University  
College of Life Sciences, Environmental Sciences – Kuwait*

<sup>i</sup> *Universidad Autónoma de Tamaulipas  
Facultad de Odontología – México*

<sup>j</sup> *USP – Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais*

\* Av. Antônia Rosa Fioravante, 804 – 09390-120 – Mauá, SP.  
[ronaldo.cozza@fatec.sp.gov.br](mailto:ronaldo.cozza@fatec.sp.gov.br)

## RESUMO

*Observando-se a importância dos materiais intermetálicos em aplicações mecânicas e metalúrgicas, o presente trabalho expôs, como objetivo, investigar o comportamento tribológico quanto às transições dos modos de desgaste micro-abrasivos atuantes na*

*liga intermetálica Fe-30Al-6Cr (at.%), ensaiada no estado metalúrgico “as cast”. O contra-corpo foi uma esfera de aço-rolamento AISI 52100, com diâmetro de 25,4 mm (1”) e as lamas micro-abrasivas foram preparadas com partículas micro-abrasivas de alumina –  $Al_2O_3$  ou carbeto de silício preto – SiC, junto com água destilada ou glicerina, em quatro possíveis combinações: “ $Al_2O_3 + H_2O$  destilada”, “ $Al_2O_3 +$  glicerina”, “SiC +  $H_2O$  destilada” e “SiC + glicerina”. Então, sob condição de força normal constante junto à diferentes composições de lamas micro-abrasivas, níveis de concentrações de lamas micro-abrasivas e distâncias de deslizamento, foi delineado um experimento fatorial. Inicialmente, foi elaborado um mapa de atuação dos modos de desgaste micro-abrasivos – considerando-se “nível de concentração”, “tipo de partícula micro-abrasiva” e “tipo líquido” de cada lama micro-abrasiva. Os resultados analisados mostraram que as ações dos modos de desgaste micro-abrasivos transitaram de “desgaste micro-abrasivo por riscamento”, ocorrendo “desgaste micro-abrasivo misto” e culminando em “desgaste micro-abrasivo por rolamento”, em função do aumento da distância de deslizamento e da composição da lama micro-abrasiva.*

**Palavras-chave:** Material intermetálico, desgaste micro-abrasivo, desgaste micro-abrasivo por riscamento, desgaste micro-abrasivo misto, desgaste micro-abrasivo por rolamento.

## 1. INTRODUÇÃO

Aluminetos, como uma classe específica de materiais, vêm sendo pesquisados desde a realização do procedimento histórico de ductilização de  $Ni_3Al$ , por meio de dopagem por boro (B), liderado por K. Aoki e colaboradores, no final da década de 1970<sup>(1)</sup>. Desde então, engenheiros e cientistas observam, de forma cautelosa, as vantagens do uso de ligas de aluminetos – materiais intermetálicos – em aplicações mecânicas e metalúrgicas. Consequentemente, desde as décadas passadas, ligas metálicas contendo aluminetos de cobalto ( $CoAl_2O_4$ ), aluminetos de ferro ( $FeAl$ ,  $Fe_3Al$ ), aluminetos de nióbio ( $NbAl$ ,  $Nb_2Al$ ,  $NbAl_3$ ), aluminetos de níquel ( $NiAl$ ,  $Ni_3Al$ ) ou aluminetos de titânio ( $TiAl$ ,  $Ti_3Al$ ,  $TiAl_3$ ) vêm sendo, intensamente pesquisadas, devido, principalmente, ao seu potencial de adoção como materiais estruturais sujeitos desde temperatura “ambiente” até temperaturas “elevadas”<sup>(2-4)</sup>.

Estas ligas contendo aluminetos apresentam uma elevada concentração de alumínio (Al)<sup>(3)</sup>, sendo capaz de formar uma contínua e aderente camada de óxido de

alumínio – alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – sobre a superfície exposta ao ar ou a atmosferas contendo oxigênio. Além da vantagem desta camada de alumina em proteger o material contra corrosão e elevadas temperaturas de oxidação<sup>(2-4)</sup>, devido a sua proeminente estabilidade termodinâmica, as ligas intermetálicas de aluminetos possuem menores densidades do que o óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) – escala característica de aços-inoxidáveis<sup>(3)</sup>, elevados pontos de fusão e, por consequência as suas estruturas cristalinas, apresentam significativas propriedades metalúrgicas e mecânicas<sup>(4-7)</sup>.

Em outra linha de pesquisa, “*desgaste micro-abrasivo*” é um problema tribológico comumente observado em componentes mecânicos de engenharia e a vida-útil destes é influenciada, diretamente, por suas propriedades metalúrgicas, mecânicas e pelas condições operacionais de trabalho. Consequentemente, quando materiais intermetálicos são direcionados para condições tribológicas adversas, as aplicações industriais prospectivas de ligas metálicas, contendo aluminetos de ferro, requerem a caracterização e a quantificação de suas propriedades tecnológicas, incluindo a análise do comportamento tribológico ao desgaste micro-abrasivo.

“*Força normal*” e “*concentração de partículas micro-abrasivas*” apresentam influência significativa sobre as atuações e transições entre os modos de desgaste micro-abrasivos<sup>(8-13)</sup>. Em linhas gerais, sob situações tribológicas envolvendo elevadas forças normais e baixas concentrações de partículas micro-abrasivas, haverá a predominância de “*micro-abrasão por riscamento*”, enquanto que, sob condições tribológicas envolvendo baixas forças normais e elevadas concentrações de partículas micro-abrasivas, há o favorecimento da ação de “*micro-abrasão por rolamento*”. Além disso, entre a atuação de “*micro-abrasão por riscamento*” e a atuação de “*micro-abrasão por rolamento*”, pode ocorrer a intitulada “*micro-abrasão mista*”, sendo caracterizada, tribologicamente, pelas ocorrências simultâneas de “*micro-abrasão por riscamento*” e “*micro-abrasão por rolamento*”.

Adicionalmente, foi observado que a distância de deslizamento também influencia, significativamente, as ações tribológicas dos modos de desgaste micro-abrasivos<sup>(14-16)</sup>. De forma qualitativa, menores distâncias de deslizamento entre corpo e contra-corpo tendenciam a manifestação de “*micro-abrasão por riscamento*”, enquanto que, aumentando-se a distância pela qual estes elementos deslizam entre si, ocorre a atuação de “*micro-abrasão por rolamento*”.

Com isso, conhecendo-se a importância que as ligas contendo aluminetos de ferro representam para aplicações/trabalhos mecânico-metalúrgicos, a abordagem do

presente trabalho alinha-se à análise tribológica comportamental em relação às ações e transições dos modos de desgaste micro-abrasivos atuantes na liga intermetálica Fe-30Al-6Cr (at.%).

## 2. MATERIAIS, TIPO DE ENSAIO DE DESGASTE & TRIBÔMETRO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiais

O material intermetálico fabricado – Fe-30Al-6Cr (at.%) – possui composição química definida em 14,14% Al, 4,95% Cr, 0,75% Mo, 0,66% C e 78,57% Fe – % em massa. As Figuras 1a e 1b apresentam imagens microestruturais da liga intermetálica, consistindo de uma matriz de aluminetos – ordem  $D0_3$  – reforçada por uma contínua rede de carbeto de cromo eutéticos nas regiões interdendríticas. Baseando-se na relação cromo/ferro, calculada por Espectroscopia de Raios-X por Dispersão em Energia (EDX), estes carbeto de cromo eutéticos foram identificados como  $M_7C_3$ . Adicionalmente, devido ao seu teor de carbono, a liga intermetálica produzida apresentou uma microestrutura rica em carbeto de cromo.

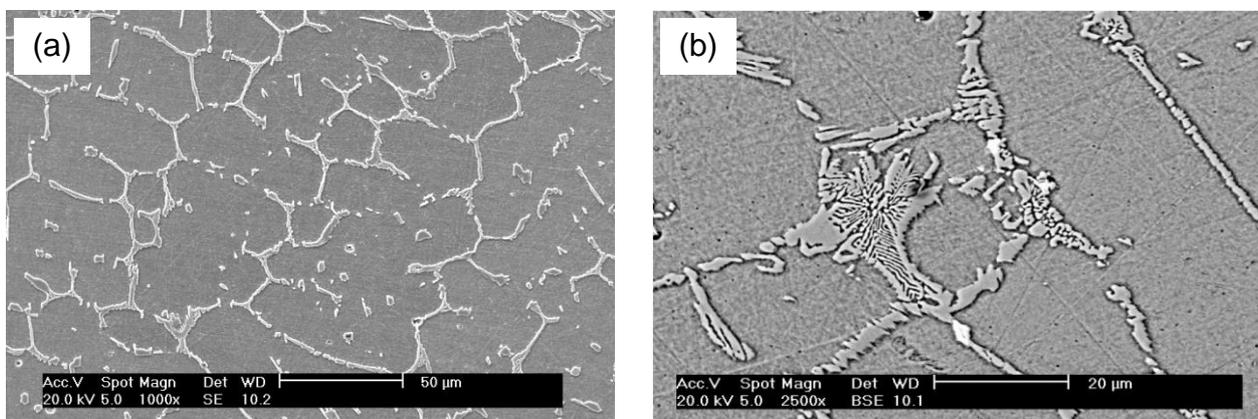


Figura 1. (a)-(b) Microestrutura da liga intermetálica Fe-30Al-6Cr (at.%).

O contra-corpo foi uma esfera de aço-rolamento AISI 52100, de diâmetro  $D = 25,4$  mm ( $D = 1$ " – diâmetro padronizado), temperado em óleo a  $860^{\circ}\text{C}$  e revenido a  $200^{\circ}\text{C}$  durante 1 h.

As lamelas micro-abrasivas foram preparadas com partículas micro-abrasivas de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou carbeto de silício preto (SiC), junto com água destilada (AD) ou glicerina (G), delineadas em quatro possíveis combinações: i) " $\text{Al}_2\text{O}_3$  + água destilada", ii) " $\text{Al}_2\text{O}_3$  + glicerina", iii) "SiC + água destilada" e iv) "SiC + glicerina".

A alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) possui tamanho médio de partícula de  $a_p = 6,5 \mu\text{m}$  e formato de caráter arredondado; por sua vez, o carbeto de silício preto ( $\text{SiC}$ ) possui tamanho médio de partícula de  $a_p = 3 \mu\text{m}$  e formato pontiagudo. A Figura 2a mostra uma imagem das partículas micro-abrasivas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e a Figura 2b apresenta uma imagem das partículas micro-abrasivas de  $\text{SiC}$ , ambas obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.

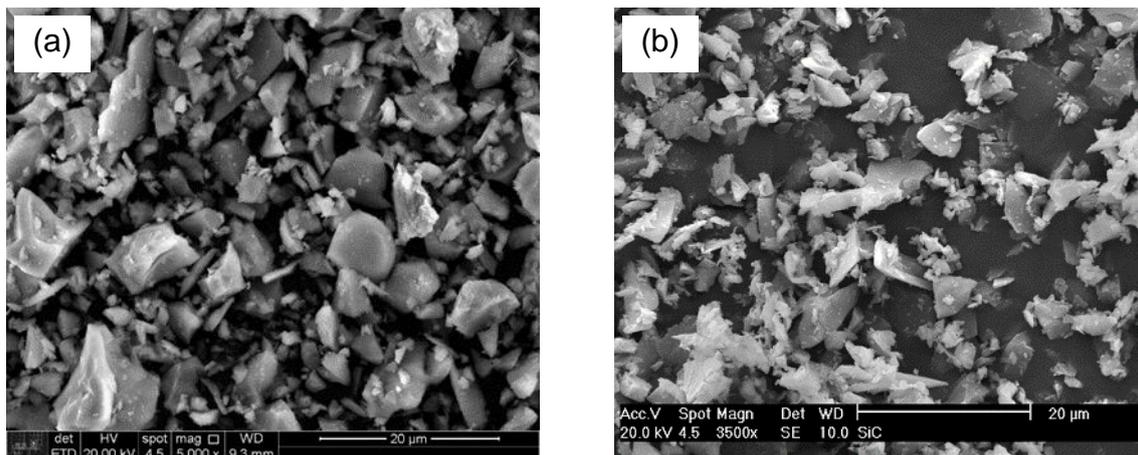


Figura 2. Imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV: (a) Partículas micro-abrasivas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e (b) partículas micro-abrasivas de  $\text{SiC}$ .

## 2.2. Tipo de Ensaio de Desgaste & Tribômetro e Parâmetros Experimentais

Para a condução dos ensaios de desgaste micro-abrasivo, foi adotada a técnica tribológica “*ball-cratering*”, cujo princípio de operação está esquematizado na Figura 3a. Neste trabalho, foi utilizado um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa de configuração mecânica “*esfera-livre*” (Figura 3b).

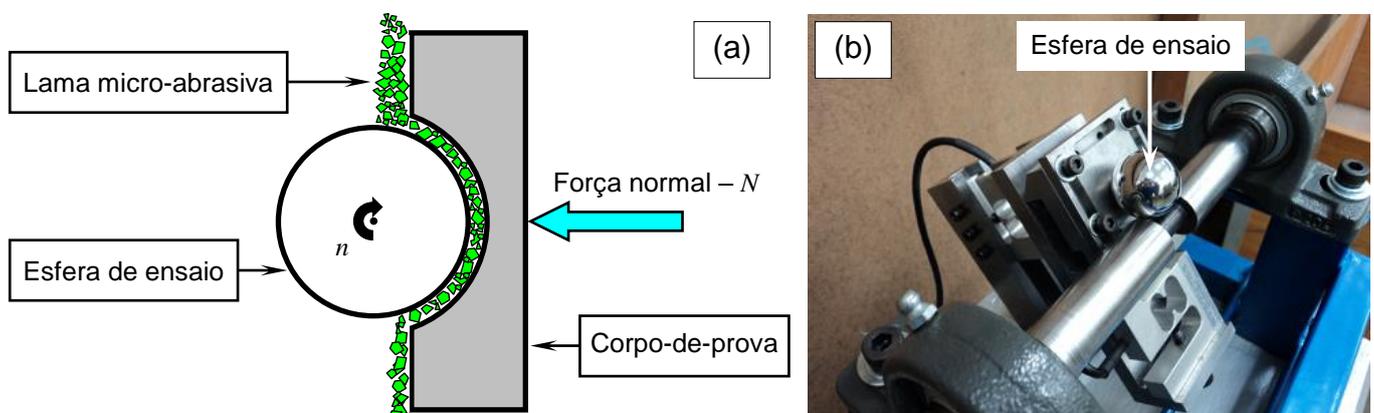


Figura 3. (a) Representação esquemática do princípio de operação do ensaio de desgaste micro-abrasivo “*ball-cratering*” e (b) equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa de configuração mecânica “*esfera-livre*”, utilizado nos ensaios deste trabalho.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de ensaio estabelecidos para a realização dos experimentos tribológicos conduzidos neste estudo.

Tabela 1. Condições tribológicas definidas para os ensaios “*ball-cratering*” de micro-abrasão.

Parâmetro de ensaio		Valor
Força normal [N]	$N$	0,4
Composição de lama micro-abrasiva (em volume)	$C_1$	5% $Al_2O_3$ + 95% água destilada
	$C_2$	5% $Al_2O_3$ + 95% glicerina
	$C_3$	5% SiC + 95% água destilada
	$C_4$	5% SiC + 95% glicerina
	$C_5$	50% $Al_2O_3$ + 50% água destilada
	$C_6$	50% $Al_2O_3$ + 50% glicerina
	$C_7$	50% SiC + 50% água destilada
	$C_8$	50% SiC + 50% glicerina
Rotação da esfera de ensaio [rpm]	$n$	70
Velocidade tangencial da esfera de ensaio [m/s]	$v$	0,093
Tempo de ensaio [min]	$t_1$	1
	$t_2$	2
	$t_3$	4
Distância de deslizamento [m]	$S_1$	5,6
	$S_2$	11,2
	$S_3$	22,4

A força normal ( $N$ ) definida para os experimentos de desgaste foi  $N = 0,4$  N, junto a oito possíveis composições de lamas micro-abrasivas ( $C$ ), sendo diferenciadas em função do tipo de partícula micro-abrasiva – alumina ( $Al_2O_3$ ) ou carvão de silício preto (SiC), tipo de líquido constituinte – água destilada (AD) ou glicerina (G), porcentagem volumétrica de partículas micro-abrasivas e líquido que compõem cada uma das misturas tribológicas, conforme as composições  $C_1, C_2, \dots, C_7$  e  $C_8$ .

A rotação da esfera de ensaio foi fixada em  $n = 70$  rpm e, junto a um diâmetro de  $D = 25,4$  mm ( $R = 12,7$  mm – raio da esfera), a velocidade tangencial da mesma ficou em  $v = 0,093$  m/s.

Três tempos de ensaio ( $t$ ) foram definidos –  $t_1 = 1$  min,  $t_2 = 2$  min e  $t_3 = 4$  min que, sob o valor da velocidade tangencial da esfera de ensaio de  $v = 0,093$  m/s, foram calculados os correspondentes valores de distâncias de deslizamento ( $S$ ), quantificados em  $S_1 = 5,6$  m,  $S_2 = 11,2$  m e  $S_3 = 22,4$  m, respectivamente.

Depois que todos os valores de força normal ( $N$ ), composições de lamas micro-abrasivas ( $C$ ) e distâncias de deslizamento ( $S$ ) foram estabelecidos, vinte e quatro possíveis combinações entre “ $N$ ”, “ $C$ ” e “ $S$ ” foram delineadas. Então, para cada combinação de “ $N + C + S$ ” – nomeadas de *Combinação 1*, *Combinação 2*, *Combinação 3*, ..., *Combinação 22*, *Combinação 23* e *Combinação 24*, três experimentos foram conduzidos para cada valor de distância de deslizamento ( $S$ ), definindo-se a seguinte sequência de ensaios, em função de  $S$ :  $5,6 \Rightarrow 5,6 \Rightarrow 22,4 \Rightarrow 11,2 \Rightarrow 11,2 \Rightarrow 22,4 \Rightarrow 22,4 \Rightarrow 11,2 \Rightarrow 5,6$  [m] – esta ordenação foi estabelecida por sorteio.

No total, setenta e dois (72) ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa foram realizados. Todos os experimentos tribológicos foram conduzidos sem interrupção e a lama micro-abrasiva foi, continuamente, agitada e gotejada entre a esfera de ensaio e o corpo-de-prova, durante as execuções experimentais.

Subseqüentemente, ao final dos experimentos tribológicos, todas as crateras de desgaste geradas foram analisadas por Microscopia Óptica, software de CAD e Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, com o propósito de reportar os modos de desgaste micro-abrasivos atuantes.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Análise das ações dos modos de desgaste micro-abrasivos

Inicialmente, na Figura 4 estão dispostas imagens de crateras de desgaste geradas nos ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa desta pesquisa. Estas imagens estão organizadas em função do tipo de composição de lama micro-abrasiva ( $C_1, C_2, \dots, C_7$  e  $C_8$ ) e da distância de deslizamento desenvolvida entre a esfera de ensaio e a liga intermetálica Fe-30Al-6Cr (at.%) ( $S_1, S_2$  e  $S_3$ ).

Após, a Figura 5 apresenta o mapa de atuações e transições dos modos de desgaste micro-abrasivo reportados neste trabalho, em função da composição da lama micro-abrasiva ( $C$ ) e da distância de deslizamento ( $S$ ), também.

**Composição da lama micro-abrasiva – C**

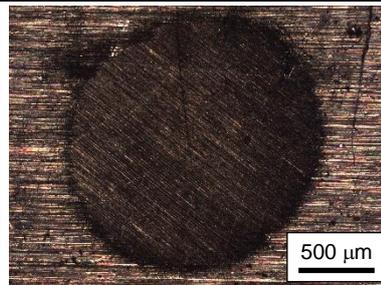
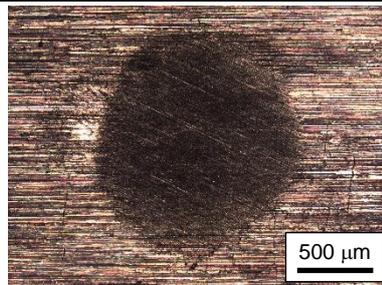
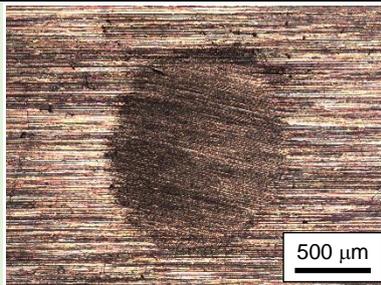
**Distância de deslizamento – S**

$S_1 = 5,6 \text{ m}$

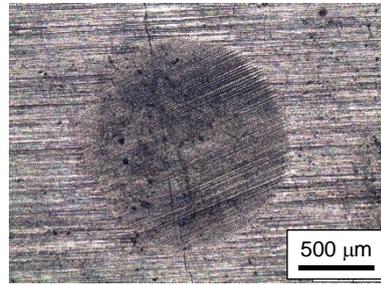
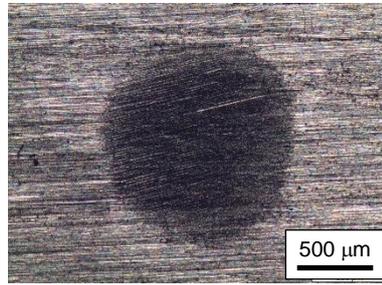
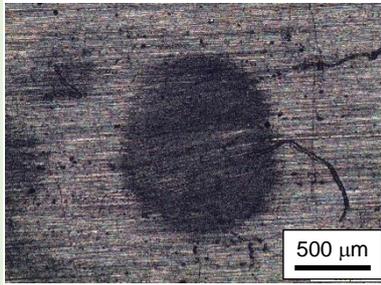
$S_2 = 11,2 \text{ m}$

$S_3 = 22,4 \text{ m}$

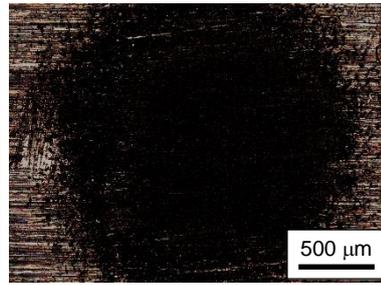
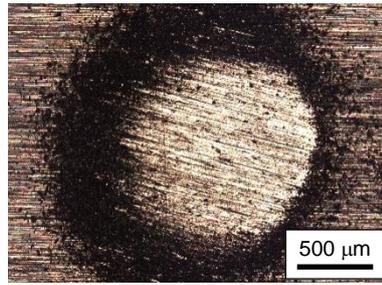
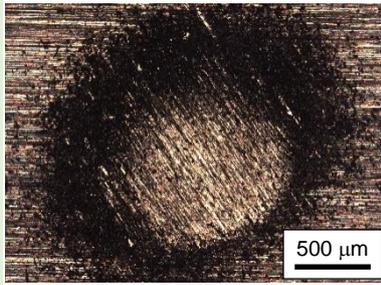
*Linha 1*  
 $C_1 = 5\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 95\% \text{ AD}$



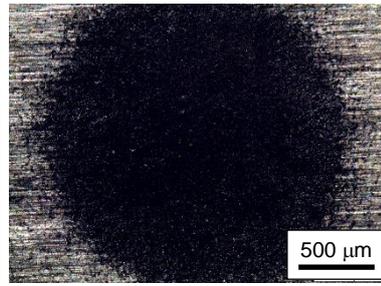
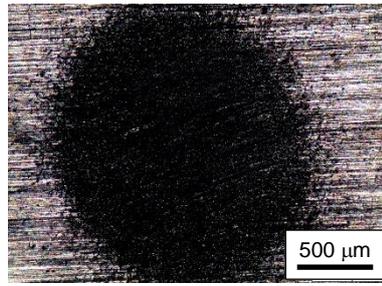
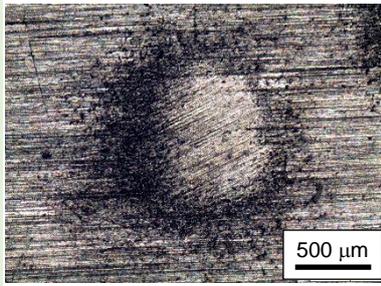
*Linha 2*  
 $C_2 = 5\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 95\% \text{ G}$



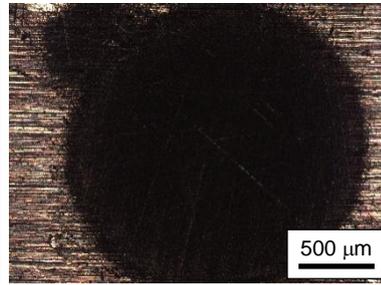
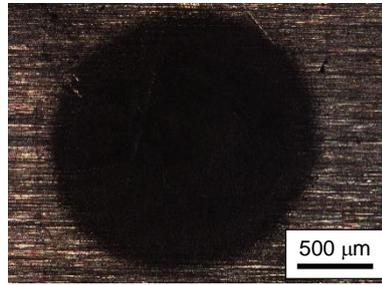
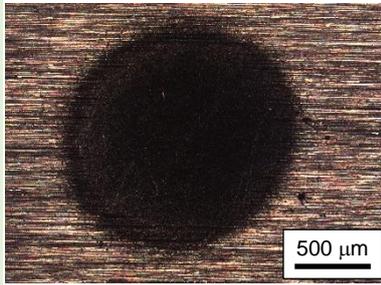
*Linha 3*  
 $C_3 = 5\% \text{ SiC} + 95\% \text{ AD}$



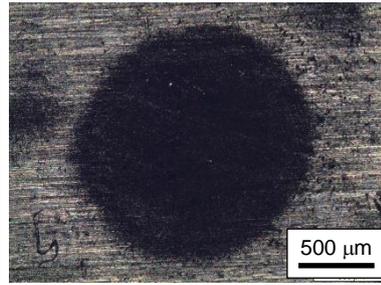
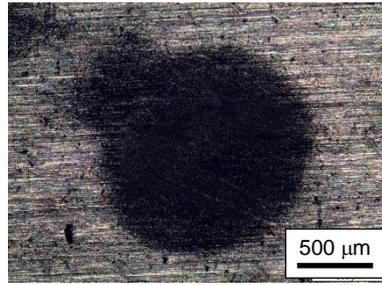
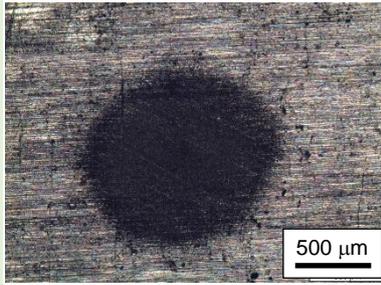
*Linha 4*  
 $C_4 = 5\% \text{ SiC} + 95\% \text{ G}$



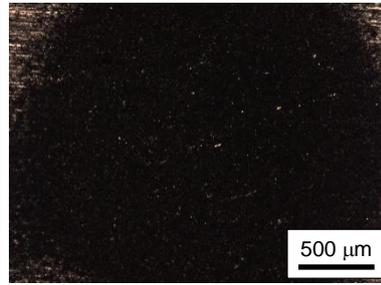
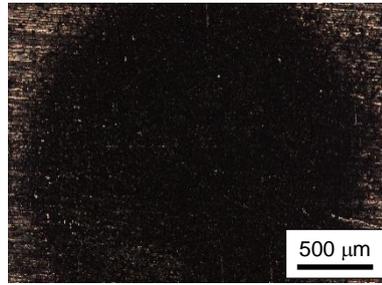
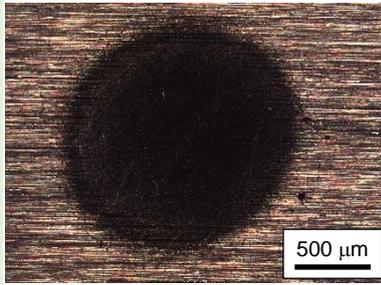
*Linha 5*  
 $C_5 = 50\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 50\% \text{ AD}$



*Linha 6*  
 $C_6 = 50\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 50\% \text{ G}$



*Linha 7*  
 $C_7 = 50\% \text{ SiC} + 50\% \text{ AD}$



*Linha 8*  
 $C_8 = 50\% \text{ SiC} + 50\% \text{ G}$

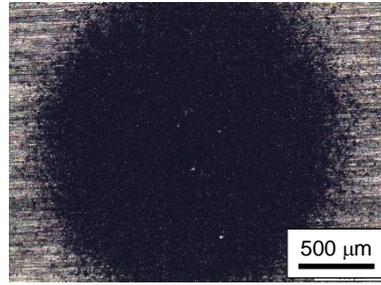
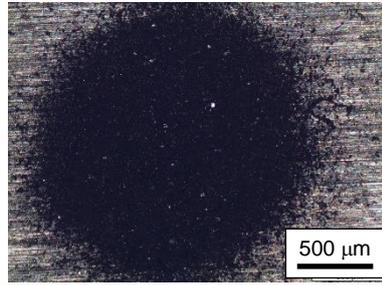
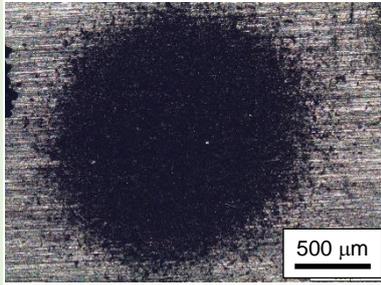


Figura 4. Crateras de desgaste geradas nos ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, organizadas em função da composição da lama micro-abrasiva (C) e da distância de deslizamento (S).

Baseado na Figura 4 ↓ Linha	Composição da lama micro-abrasiva – C	Distância de deslizamento – S		
		S <sub>1</sub> = 5,6 m	S <sub>2</sub> = 11,2 m	S <sub>3</sub> = 22,4 m
1	C <sub>1</sub> = 5% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 95% AD	Micro-abrasão por “ <i>riscamento</i> ”		
2	C <sub>2</sub> = 5% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 95% G			
3	C <sub>3</sub> = 5% SiC + 95% AD	Micro-abrasão “ <i>mista</i> ”		
4	C <sub>4</sub> = 5% SiC + 95% G			
5	C <sub>5</sub> = 50% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 50% AD	Micro-abrasão por “ <i>rolamento</i> ”		
6	C <sub>6</sub> = 50% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 50% G			
7	C <sub>7</sub> = 50% SiC + 50% AD			
8	C <sub>8</sub> = 50% SiC + 50% G			

Figura 5. Mapa de atuações e transições dos modos de desgaste micro-abrasivo, em função da composição da lama micro-abrasiva (C) e da distância de deslizamento (S).

### 3.2. Atuação do modo de desgaste micro-abrasivo por “*riscamento*”

Junto as composições de lamas micro-abrasivas “C<sub>1</sub> = 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 95% AD” e “C<sub>2</sub> = 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 95% G”, todas as crateras de desgaste apresentaram a ocorrência de desgaste micro-abrasivo por “*riscamento*”, conforme mostram as “*Linhas 1 e 2*” das Figuras 4 e 5.

A ocorrência de desgaste micro-abrasivo por “*riscamento*”, para todos os valores de distância de deslizamento (S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub>), foi reportada, somente, para as crateras de desgaste geradas sob a concentração (C<sub>n</sub>) contendo 5% de partículas micro-abrasivas de alumina – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – e independeu do líquido constituinte da lama micro-abrasiva – água destilada (AD) ou glicerina (G).

Cozza *et al*!<sup>(17,18)</sup> justificam este comportamento baseando-se na pressão de contato (P) desenvolvida no sistema tribológico “*esfera de ensaio + partículas micro-abrasivas + corpo-de-prova*”, definida pela Equação 1<sup>(17)</sup>, em que A<sub>t</sub> é a área projetada total da cratera de desgaste.

$$P = \frac{N}{A_t} \quad (1)$$

Adicionalmente, conceitua-se que a “*força normal – N*” – aplicada sobre o sistema tribológico durante os ensaios – é distribuída junto as “*n<sub>p</sub>*” partículas micro-

abrasivas presentes entre a esfera de ensaio e o corpo-de-prova. Portanto, devido a baixa concentração de lama micro-abrasiva definida neste trabalho ( $C_n = 5\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ ), a quantidade de partículas micro-abrasivas atuantes no processo de desgaste, entre a esfera de ensaio e o corpo-de-prova, ficou reduzida, fazendo com que, a “força normal agindo sobre cada partícula micro-abrasiva –  $\Delta N$ ” fosse maior –  $n_p \downarrow \Delta N \uparrow \Rightarrow \Delta N$  é inversamente proporcional a  $n_p$ . Fisicamente, a somatória de todos os valores de  $\Delta N$  resulta na “força normal –  $N$ ” aplicada sobre o sistema tribológico para a execução do ensaio – Equação 2:

$$N = \sum_{i=1}^{n_p} \Delta N_i \quad (2)$$

Com isso, devido a baixa capacidade de mobilidade imposta ao material micro-abrasivo que esta condição dinâmica promoveu, as partículas micro-abrasivas foram capazes de realizar somente o movimento cinemático de “*translação*” – ato *translatório* – sobre as superfícies das crateras de desgaste, gerando, conseqüentemente, desgaste micro-abrasivo por “*riscamento*” na liga intermetálica Fe-30Al-6Cr (at.%).

### 3.3. Atuação do modo de desgaste micro-abrasivo “*misto*”

Nos ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa conduzidos com as composições de lamas micro-abrasivas “ $C_3 = 5\% \text{ SiC} + 95\% \text{ AD}$ ” e “ $C_4 = 5\% \text{ SiC} + 95\% \text{ G}$ ” foram reportadas as transições entre os modos de desgaste micro-abrasivo “*misto*” e desgaste micro-abrasivo por “*rolamento*”  $\Rightarrow$  de “*micro-abrasão mista*” para “*micro-abrasão por rolamento*” – com o aumento da distância de deslizamento ( $S$ ), conforme exhibe as “Linhas 3 e 4”, das Figuras 4 e 5.

Sob a composição de lama micro-abrasiva  $C_3 = 5\% \text{ SiC} + 95\% \text{ AD}$ , foi reportada a ocorrência de desgaste micro-abrasivo “*misto*” para as distâncias de deslizamento  $S_1 = 5,6 \text{ m}$  e  $S_2 = 11,2 \text{ m}$ ; para  $S_3 = 22,4 \text{ m}$ , foi registrada a ação de desgaste micro-abrasivo por “*rolamento*”. Com a adoção da lama micro-abrasiva de composição  $C_4 = 5\% \text{ SiC} + 95\% \text{ G}$ , foram relatadas as ocorrências de desgaste micro-abrasivo “*misto*” para a distância de deslizamento  $S_1 = 5,6 \text{ m}$  e desgaste micro-abrasivo por “*rolamento*” para as distâncias de deslizamento  $S_2 = 11,2 \text{ m}$  e  $S_3 = 22,4 \text{ m}$ .

Sobre este fenômeno tribológico, Cozza<sup>(14,19)</sup> explica a transição entre os modos de desgaste micro-abrasivos com base na variação da distância de deslizamento ( $S$ ) junto ao tamanho médio das partículas micro-abrasivas ( $a_p$ ).

Com o aumento do valor da distância de deslizamento ( $S$ ) e o conseqüente incremento da área superficial total de cada cratera de desgaste ( $A_s$ ), passou a agir uma quantidade maior de partículas micro-abrasivas no processo de desgaste, entre a esfera de ensaio e a liga intermetálica Fe-30Al-6Cr (at.%). Adicionalmente a esta condição geométrica-numérica entre  $S$ ,  $A_s$  e  $n_p$ , há, também, o fato de que o tamanho médio das partículas micro-abrasivas de SiC é menor do que o tamanho médio das partículas micro-abrasivas de  $Al_2O_3$  –  $a_p = 3 \mu m$  e  $a_p = 6,5 \mu m$ , respectivamente – permitindo, assim, que houvesse uma quantidade ainda maior de material micro-abrasivo sobre a superfície de cada cratera de desgaste gerada no material intermetálico, sob a adoção de carbeto de silício preto. Com isso, para um mesmo valor de  $A_s$ , há, no mínimo, o dobro de partículas micro-abrasivas de SiC do que em relação a  $Al_2O_3$ , conforme mostra a Equação 3:

$$\frac{a_{p-Al_2O_3}}{a_{p-SiC}} = \frac{6,5 \mu m}{3 \mu m} \rightarrow \frac{a_{p-Al_2O_3}}{a_{p-SiC}} = 2,17 \therefore a_{p-Al_2O_3} = 2,17 \times a_{p-SiC} \quad (3)$$

Por sua vez, como a “força normal –  $N$ ” foi mantida constante, a “força normal agindo sobre cada partícula micro-abrasiva –  $\Delta N$ ” de SiC diminuiu gradativamente e sob uma taxa de decaimento maior do que em relação a  $\Delta N$  agindo sobre as partículas micro-abrasivas de  $Al_2O_3$  – devido a maior quantidade de partículas micro-abrasivas de SiC presentes no sistema tribológico – ocasionando, conseqüentemente, que estas partículas micro-abrasivas adquirissem, também de forma gradativa e sob um tempo menor, maior grau de liberdade para atos de movimentação. Isto resultou que, ao longo do tempo, as partículas micro-abrasivas deixaram de realizar somente “ato translatório” – responsável pela parcela de desgaste micro-abrasivo por “riscamento” na região central das calotas esféricas – e passaram a executar, também, os movimentos cinemáticos de “translação + rotação” – em particular e com maior tenuidade, nas bordas de cada calota esférica, locais que foram reportadas as atuações de desgaste micro-abrasivo por “rolamento”.

### 3.4. Atuação do modo de desgaste micro-abrasivo por “rolamento”

Os ensaios “ball-cratering” realizados com as composições de lamas micro-abrasivas “ $C_5 = 50\% Al_2O_3 + 50\% AD$ ”, “ $C_6 = 50\% Al_2O_3 + 50\% G$ ”, “ $C_7 = 50\% SiC + 50\% AD$ ” e “ $C_8 = 50\% SiC + 50\% G$ ” ocasionaram, em todas as crateras de desgaste,

a ocorrência de desgaste micro-abrasivo por “*rolamento*”, independente da distância de deslizamento ( $S$ ), do tipo de partícula micro-abrasiva –  $Al_2O_3$  (alumina) ou SiC (carbeto de silício preto) – e do tipo de líquido – água destilada (AD) ou glicerina (G), com referência as “*Linhas 5-8*”, das Figuras 4 e 5.

Como já fundamentado, o aumento da distância de deslizamento ( $S$ ) conduz a um conseqüente aumento da área superficial total da cratera de desgaste ( $A_s$ ), possibilitando, assim, a acomodação de uma quantidade maior de partículas micro-abrasivas junto ao sistema tribológico. Aumentando-se o valor da concentração da lama micro-abrasiva de  $C_n = 5\%$  de material micro-abrasivo para  $C_n = 50\%$  de material micro-abrasivo, há uma ocupação proporcionalmente maior da área superficial total da cratera de desgaste ( $A_s$ ) por partículas micro-abrasivas, fazendo com que a força normal atuando sobre cada partícula micro-abrasiva ( $\Delta N$ ) seja, também, proporcionalmente menor.

Por sua vez, junto a maior taxa de decaimento de  $\Delta N$ , há, conseqüentemente, um incremento significativo no nível de mobilidade das partículas micro-abrasivas, sendo, sob esta condição física, capazes de realizar os movimentos cinemáticos de “*translação + rotação*”, gerando, assim, desgaste micro-abrasivo por “*rolamento*” sobre a superfície da cratera de desgaste.

#### 4. CONCLUSÕES

A composição da lama micro-abrasiva apresentou influência sobre as atuações e as transições entre os modos de desgaste micro-abrasivos, conforme as fundamentações organizadas a seguir:

- (1) Sob uma concentração de lama micro-abrasiva de  $C_n = 5\%$  de material micro-abrasivo, o tipo de material micro-abrasivo, o tipo de líquido e a distância de deslizamento apresentaram influência sobre as ações e sobre as transições entre os modos de desgaste micro-abrasivos. Com a adoção de  $Al_2O_3$ , todas as condições tribológicas condicionaram os resultados a convergirem para a atuação de desgaste micro-abrasivo por “*riscamento*” sobre a superfície da liga intermetálica Fe-30Al-6Cr (at.%). Por outro lado, com o uso de SiC, as ações de “*micro-abrasão mista*” e “*micro-abrasão por rolamento*”, assim como as transições de “*micro-abrasão mista*” para “*micro-abrasão por rolamento*”, sofreram interferências quanto a adoção de água destilada ou glicerina como líquido constituinte da lama micro-abrasiva e quanto a distância de deslizamento;

- (2) Sob uma concentração de lama micro-abrasiva de  $C_n = 50\%$  de material micro-abrasivo, o tipo de material micro-abrasivo, o tipo de líquido e a distância de deslizamento não apresentaram influência sobre as transições entre os modos de desgaste micro-abrasivos, sendo reportada, somente, a atuação de desgaste micro-abrasivo por “rolamento” na superfície da liga intermetálica Fe-30Al-6Cr (at.%).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) K. Aoki. Ductilization of L1<sub>2</sub> Intermetallic Compound Ni<sub>3</sub>Al by Microalloying with Boron. Materials Transactions – JIM 31 (6) (1990) 443-448.  
<https://www.jim.or.jp/journal/e/31/06/443.html>
- (2) J.H. Schneibel, E.P. George, I.M. Anderson. Tensile ductility, slow crack growth, and fracture mode of ternary B2 iron aluminides at room temperature. Intermetallics 5 (3) (1997) 185-193.  
[https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(96\)00087-8](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(96)00087-8)
- (3) S.C. Deevi, V.K. Sikka. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. Intermetallics 4 (1996) 357-375.  
[https://doi.org/10.1016/0966-9795\(95\)00056-9](https://doi.org/10.1016/0966-9795(95)00056-9)
- (4) D.G. Morris. Possibilities for high-temperature strengthening in iron aluminides. Intermetallics 6 (1998) 753-758.  
[https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(98\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(98)00028-4)
- (5) F. Stein, A. Schneider, G. Frommeyer. Flow stress anomaly and order-disorder transitions in Fe<sub>3</sub>Al-based Fe-Al-Ti-X alloys with X = V, Cr, Nb, or Mo. Intermetallics 11 (2003) 71-82.  
[https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(02\)00187-5](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(02)00187-5)
- (6) F. Dobeš, K. Milička. Estimation of ductility of Fe-Al alloys by means of small punch test. Intermetallics 18 (2010) 1357-1359.  
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2009.11.002>
- (7) D.G. Morris, J. Chao, C. Garcia Oca, M.A. Muñoz-Morris. Obtaining good ductility in an FeAl intermetallic. Materials Science and Engineering A339 (2003) 232-240.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00108-9)
- (8) R.I. Trezona, D.N. Allsopp, I.M. Hutchings. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. Wear 225-229 (1999) 205-214.  
[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00358-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00358-5)
- (9) K. Adachi, I.M. Hutchings. Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test. Wear 255 (2003) 23-29.  
[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00073-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00073-5)
- (10) J.O. Bello, R.J.K. Wood. Grooving micro-abrasion of polyamide 11 coated carbon steel tubulars for downhole application. Wear 255 (7-12) (2003) 1157-1167.  
[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00226-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00226-6)
- (11) J.O. Bello, R.J.K. Wood. Micro-abrasion of filled and unfilled polyamide 11 coatings. Wear 258 (1-4) (2005) 294-302.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.08.008>

- (12) K. Adachi, I.M. Hutchings. Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and material hardness. *Wear* 258 (1-4) (2005) 318-321.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.02.016>
- (13) K. Bose, R.J.K. Wood. Optimum tests conditions for attaining uniform rolling abrasion in ball cratering tests on hard coatings. *Wear* 258 (1-4) (2005) 322-332.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.018>
- (14) R.C. Cozza. Effect of sliding distance on abrasive wear modes transition. *Journal of Materials Research and Technology* 4 (2) (2015) 144-150.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.10.007>
- (15) R.C. Cozza, C.G. Schön. Evidence of Superposition between Grooving Abrasion and Rolling Abrasion. *Tribology Transactions* 58 (2015) 875-881.  
<https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1024907>
- (16) M.T. Umemura, L.B. Varela, C.E. Pinedo, R.C. Cozza, A.P. Tschiptschin. Assessment of tribological properties of plasma nitrided 410S ferritic-martensitic stainless steels. *Wear* 426-427 (2019) 49-58.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.092>
- (17) R.C. Cozza, J.D.B. de Mello, D.K. Tanaka, R.M. Souza. Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests. *Wear* 263 (1-6) (2007) 111-116.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.099>
- (18) M.M. Macedo, J.H. Luna-Domínguez, V. Verma, C.G. Schön, R.C. Cozza. Assessment of micro-abrasive wear tribological properties of H10 tool-steel under conditions of “*constant normal force*  $\Rightarrow$  *variable pressure*” and “*constant pressure*  $\Rightarrow$  *variable normal force*”. *Wear* 476 (2021) 203664.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203664>
- (19) R.C. Cozza. Third abrasive wear mode: is it possible? *Journal of Materials Research and Technology* 3 (2) (2014) 191-193.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.03.010>

**SYNERGISM BETWEEN “CONCENTRATION LEVEL”, “TYPE OF MICRO-ABRASIVE PARTICLE” AND “TYPE OF LIQUID” OF MICRO-ABRASIVE SLURRIES ON MICRO-ABRASIVE WEAR BEHAVIOR OF THE Fe-30Al-6Cr (at.%) INTERMETALLIC ALLOY – PART I: MICRO-ABRASIVE WEAR MODES**

**ABSTRACT**

*Realizing the importance of intermetallic materials in mechanical and metallurgical applications, the present work aims at investigating the micro-abrasive wear behaviour of the Fe-30Al-6Cr (at.%) intermetallic alloy, tested in the “as cast” state. The counter-body was an AISI 52100 bearing-steel sphere with a diameter of 25.4 mm (1”), and the micro-abrasive slurries were prepared with micro-abrasive particles of alumina –  $Al_2O_3$  or black silicon carbide – SiC, and distilled water or glycerin, into the following four possible combinations of materials  $\Rightarrow$  “ $Al_2O_3 + H_2O$  distilled”, “ $Al_2O_3 + glycerin$ ”, “SiC +  $H_2O$  distilled” and “SiC + glycerin”. Then, establishing a test condition of constant normal force, together with different levels micro-abrasive slurries concentrations and sliding distances, a factorial experiment was designed. Initially, a map of action of the micro-abrasive wear modes was as a function of the “concentration level”, “type of micro-abrasive particle”, and “type of liquid” for each micro-abrasive slurry used in the experiments. The obtained results showed that the actions of the micro-abrasive wear modes transitioned from “grooving micro-abrasion”, occurring “mixed micro-abrasion”, and culminating in “rolling micro-abrasion”, due to the increase of the sliding distance, and of the micro-abrasive slurry composition.*

**Keywords:** Intermetallic material, micro-abrasive wear, grooving micro-abrasive wear, mixed micro-abrasive wear, rolling micro-abrasive wear.