

Paulo Jorge Nunes Ribeiro

Transformação de fase em ferro fundido
cinzento de matriz perlítica induzida pelo
processo de eletroerosão

São Paulo

2013

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP

Paulo Jorge Nunes Ribeiro

Transformação de fase em ferro fundido cinzento de matriz perlítica induzida pelo processo de eletroerosão

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Departamento de Engenharia Metalúrgica e
de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Cesar R. F. Azevedo

São Paulo

2013

TF - 2013

R 355 t

M 2013 G

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800008671

2393 109

FICHA CATALOGRÁFICA

Ribeiro, Paulo Jorge Nunes

Transformação de fase em ferro fundido cinzento de matriz perlítica induzida pelo processo de eletroerosão / P.J.N. Ribeiro.
-- São Paulo, 2013.

61 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Ferro fundido cinzento 2.Eletroerosão 3.Ensaio tribológico I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e padrinhos pela educação, ensinamentos, princípios e incentivos dedicados durante toda minha vida e a minha namorada pelo constante apoio, inspiração e companheirismo.

A Escola Politécnica e a todo Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo conhecimento técnico e formação profissional. Em especial ao Prof. Dr. Cesar Azevedo, pela orientação e apoio durante minha formação; e ao Prof. Dr. Ivan Falleiros por ensinar a pensar em átomos.

Ao pessoal técnico do BAM, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Abteilung 5, Werkstofftechnik, Fachbereich 5.1, Materialographie, Fraktographie und Alterung technischer Werkstoffe, em especial ao Dr.-Ing. Pedro Dolabella Portella, Dr.-Ing. Werner Österle, Herr Cornelius Deutsch, Dr. Ing. Christine Neumann e Dr. Ing. Manfred Hartelt, que cederam as amostras e permitiram a execução dos experimentos.

E a Deus pela vida e por possibilitar a presença de todas estas pessoas ao meu lado.

“Penso noventa e nove vezes e nada descubro; deixo de pensar, mergulho em profundo silêncio - e eis que a verdade se me revela”

Albert Einstein

Resumo

Processo de eletroerosão foi aplicado com o objetivo de obter diferentes rugosidades de amostras de ferro fundido cinzento de matriz perlítica para os ensaios tribológicos. Os ensaios tribológicos de amostras planas de ferro fundido (discos de 40 mm) contra anel de aço (10 mm – 5 mm) foram realizados em várias condições de adição de material particulado (sem adição, com adição de nanopartículas de Fe_3O_4 e com adição de nanopartículas de Fe_3O_4 e grafite) e de rugosidade superficial (GG_g : 1,13 μm ; GG_{e1} : 1,52 μm ; GG_{e2} : 4,55 μm ; GG_{e3} : 17,04 μm). Os resultados dos ensaios tribológicos não puderam ser interpretados e análise microestrutural usando FIB foi utilizada. Em teoria o processo de eletroerosão deveria alterar as características de rugosidade superficial das amostras de ferro fundido, mas os ensaios de caracterização microestrutural indicaram a ocorrência de importante alteração microestrutural nas amostras após eletroerosão. A amostra na condição inicial (lixada - GG_g) tinha microestrutura de matriz perlítica com veios de grafita perlítica e após os ensaios tribológicos (Força Normal: 60 N – Frequência: 5 Hz – Ciclos: 10^4) verificou-se somente uma fina camada superficial de tribofilme (GG_{g1} : Fe_3O_4 ; GG_{g2} : Fe_3O_4 +grafita) seguida por uma fina camada (GG_{g1} : 1,00 μm ; GG_{g2} : 1,25 μm de profundidade) que sofreu deformação plástica. Já nas amostras eletroerodidas, observou-se a presença de camada superficial que sofreu fusão incipiente seguida de rápida solidificação. Em amostra particular (GG_{e3}) é possível verificar-se inclusive a presença de dendritas. Este trabalho irá apresentar estes resultados e discuti-los, verificando a possibilidade de usar o processo de eletroerosão como um processo de tratamento de superfície.

Abstract

EDM process was applied in order to obtain samples of different roughness of gray cast iron pearlitic matrix for the tribological tests. The tribological test samples flat iron disks (40 mm) against a steel ring (10 mm - 5 mm) were performed under various conditions of adding particulate material (without adding, adding Fe_3O_4 -nanoparticles, adding Fe_3O_4 -nanoparticles and graphite) and surface roughness (GGg: 1,13 μm ; GGe1: 1,52 μm ; GGe2: 4,55 μm ; GGe3: 17,04 μm). The test results couldn't be interpreted, so tribological and microstructural analysis using FIB has been used. In theory EDM process should change the characteristics of surface roughness of the samples of cast iron, but the microstructural characterization tests indicated the occurrence of important microstructural change in the samples after electroerosion. The sample in the initial condition (grinded - GGg) had microstructure of pearlitic matrix with graphite flakes and pearlite after tribological tests (Normal Force: 60 N - Frequency: 5 Hz - Cycles: 10^4), there was only a thin surface layer tribofilm (GGg1: Fe_3O_4 ; GGg2: Fe_3O_4 + graphite) followed by a thin layer (GGg1: 1,00 μm ; GGg2: 1,25 μm in depth), which has undergone plastic deformation. Since the electroeroded samples, is observed the presence of the surface layer that has undergone incipient melting followed by rapid solidification. In a particular sample (GGe3) can notice the presence of dendrites. This paper will discuss these results and present them to verify the possibility of using the EDM process as a process of surface treatment.

Lista de Figuras

Figura 1. – Ferros fundidos: teores de C e Si na composição da liga, em percentual e influências na estrutura da matriz. Adaptado de (1).	3
Figura 2. – Reticulado cristalino hexagonal da grafita. Adaptado de (3).	4
Figura 3. – Tipo de precipitados de grafita em ferros fundidos cinzentos, segundo norma ASTM (aumento de 100x, redimensionados). Adaptado de (2).	5
Figura 4. – Curvas de resfriamento para ferro fundido e espessuras dos precipitados de grafita. Espessura 0,6/1,0/1,6/2,2/3,0 cm de 1 a 5 respectivamente. Adaptado de (5).	6
Figura 5. – Micrografias de grafitas (cor cinza) em matriz de ferro fundido, espessuras: 0,6/1,0/1,6/2,2/3,0 cm de (a) a (e) respectivamente. Reagente Stead. Adaptado de (5).	6
Figura 6. – Exemplo de desgaste cortante. Esquema teórico e processo simulado observado em microscópio eletrônico de varredura (7).	8
Figura 7. – Microscopia óptica: ferro fundido cinzento sem ataque (105x, 100x; 100x), com veios de grafita (escura) (9).	9
Figura 8. – Microscopia FIB: ferro fundido cinzento perlítico com veios de grafita. Detalhes para as fases ferrita (clara) e cementita (escura), e veio de grafita (10).	9
Figura 9. – Exemplo de telas do Software da fabricante Sodick (mais de 10.000 condições de usinagem). Inserção de parâmetros de materiais e redução dimensional (13).	10
Figura 10. – Diagrama do processo de eletroerosão (EDM - <i>Electro Discharge Machining</i>) (11).	11
Figura 11. – Fluido dielétrico durante processo de eletroerosão. Integração do CNC com software de CAD. Exemplos peças usinadas por eletroerosão (13).	12
Figura 12. – Processo de eletroerosão: eletrodo tipo lança, e retirada de material fundido da cavidade usinada (13).	12
Figura 13. – Parâmetro de rugosidade média Ra (14).	13
Figura 14. – Parâmetro de amplitude média máxima Rz (14).	13
Figura 15. – Tribologia: Tipos de desgastes (16).	14

Figura 16. – Tribologia: tipos de ensaios. (a) pino a disco; (b) pino sobre chapa (c) pino a tambor; (d) bloco contra disco (15).	15
Figura 17. – Discos de ferro fundido após eletroerosão. Da esquerda para direita: disco lixado (GGg), eletroerodido-1 (GGe1), eletroerodido-2 (GGe2) e eletroerodido-3 (GGe3).	17
Figura 18. – Equipamento de eletroerosão (EDM submerso) modelo AG60L, fabricante Sodick.	18
Figura 19. – Condição dos ensaios tribológicos. (1) nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de 30% grafita; (2) nanopartículas de Fe_3O_4	19
Figura 20. – Perfis do ensaio tribológico. Posicionamento da amostra e do anel de aço no equipamento.	19
Figura 21. – Exemplo de FIB: (a) microusinagem (cavidades) e deposição de camada de platina; (b) detalhe a amostra de 12 μm a ser retirada para análise (10). ..	20
Figura 22. – Cavidades usinadas por FIB: aplicação de passe único e múltiplos passes (18).	20
Figura 23. – Processo FIB: (a) modelo de visualização; (b) exemplo de amostra usinada (19).	21
Figura 24. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido lixado; GGg; antes dos ensaios tribológicos.	22
Figura 25. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido eletroerodido; GGe1; antes dos ensaios tribológicos.	23
Figura 26. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido eletroerodido; GGe2; antes dos ensaios tribológicos.	23
Figura 27. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido eletroerodido; GGe3; antes dos ensaios tribológicos.	24
Figura 28. – Dados de rugosidade média (R_a) antes dos ensaios tribológicos das amostras planas de ferro fundido cinzento.	25
Figura 29. – Discos de ferro fundido cinzento. Da esquerda para direita: disco lixado (GGg), eletroerodido-1 (GGe1), eletroerodido-2 (GGe2) e eletroerodido-3 (GGe3). Material particulado: 1: Fe_3O_4 + 30% grafita / 2: Fe_3O_4	26
Figura 30. – Comparativo de rugosidade média (R_a) entre os discos GGg, GGe1, GGe2 e GGe3; Materiais particulados: nenhum, nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita e Fe_3O_4	28

Figura 31. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido lixado (GGg); após ensaios tribológicos. Material particulado: 1: nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita/ 2: nanopartículas de Fe_3O_4	29
Figura 32. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido eletroerodido-1 (GGe1); após ensaios tribológicos. Material particulado: 1: nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita/ 2: nanopartículas de Fe_3O_4	30
Figura 33. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido eletroerodido-2 (GGe2); após ensaios tribológicos. Material particulado: 1: nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita/ 2: nanopartículas de Fe_3O_4	31
Figura 34. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido eletroerodido-3 (GGe3); após ensaios tribológicos. Material particulado: 1: nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita/ 2: nanopartículas de Fe_3O_4	32
Figura 35. – Rugosidade média (R_a) antes e após os ensaios tribológicos.	33
Figura 36. – Desenvolvimento do coeficiente de atrito durante os ensaios tribológicos. Amostra GGg. Nanopartículas de Fe_3O_4 e nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita.....	35
Figura 37. – Desenvolvimento do coeficiente de atrito durante os ensaios tribológicos. Amostra GGe1. Nanopartículas de Fe_3O_4 e nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita.....	35
Figura 38. – Desenvolvimento do coeficiente de atrito durante os ensaios tribológicos. Amostra GGe2. Nanopartículas de Fe_3O_4 e nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita.....	36
Figura 39. – Desenvolvimento do coeficiente de atrito durante os ensaios tribológicos. Amostra GGe3. Nanopartículas de Fe_3O_4 e nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita.....	36
Figura 40. – Micrografias, FIB, amostra GGg (sem eletroerosão) pré-ensaio tribológico: (a) detalhe das marcas de lixa na superfície, 5.000x (b1 e b2) microestrutura perlítica, 20.000x. Matriz perlítica: ferrita (clara) e cementita (escura).	39
Figura 41. – Micrografias, FIB, amostra GGg (sem eletroerosão) após ensaio tribológico com material particulado de nanopartículas de Fe_3O_4 + 30% C: (a.1) detalhe das marcas de abrasão na superfície 800x, (a.2) visão geral do corte da amostra 10.000x, (b1 e b2) microestrutura perlítica com diferentes colônias, 20.000x.	40

Figura 42. – Micrografias, FIB, amostra GGg (sem eletroerosão) após ensaio tribológico com material particulado de nanopartículas de Fe_3O_4 : (a.1) detalhe das marcas de abrasão na superfície 5.000x, (a.2) visão geral do corte da amostra 10.000x, (b1 e b2) microestrutura perlítica com veio de grafita, 20.000x.41

Figura 43. – Micrografias, FIB, amostra GGe1 (com processo de eletroerosão) antes do ensaio tribológico: (a.1) detalhe da superfície, poças de fusão 3.500x, (a.2) visão geral do corte da amostra 10.000x, (b1 e b2) microestrutura perlítica, com veio de grafita, 20.000x.43

Figura 44. – Micrografias, FIB, amostra GGe1 (com processo de eletroerosão) após ensaio tribológico com material particulado de nanopartículas de $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 30\% \text{ C}$: (a.1) detalhe da superfície, marcas de abrasão do ensaio tribológico, 3.500x, (a.2) visão geral do corte da amostra 12.000x, (b1 e b2) microestrutura perlítica com veio de grafita, 20.000x.44

Figura 45. – Micrografias, FIB, amostra GGe1 (com processo de eletroerosão) após ensaio tribológico com material particulado de nanopartículas de Fe_3O_4 : (a.1) detalhe da superfície, marcas de abrasão do triboteste, 3.500x, (a.2) visão geral do corte da amostra 12.000x, (b1;b2) microestrutura perlítica com veio de grafita, 20.000x.46

Figura 46. – Micrografias, FIB, amostra GGe3 (com processo de eletroerosão) pré-ensaio tribológico: (a.1) detalhe da superfície, poças de fusão e bolhas solidificadas resultantes do processo de eletroerosão 1.000x, (a.2) visão geral do corte da amostra, presença de dendritas, 10.000x, (b1;b2) detalhe da microestrutura dendrítica, 25.000x, (c.1;c.2) visão geral da microestrutura dendrítica 20.000x.48

Figura 47. – Micrografias, FIB, amostra GGe3 (com processo de eletroerosão) pós-ensaio tribológico com material particulado de nanopartículas de $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 30\% \text{ C}$: (a.1) detalhe da superfície, bolhas solidificadas resultantes do processo de eletroerosão com marcas de abrasão, 300x, (a.2) visão geral do corte da amostra, presença de dendritas 10.000x, (b1;b2) detalhe da microestrutura dendrítica, 25.000x.50

Figura 48. – Micrografias, FIB, amostra GGe3 (com processo de eletroerosão) pós-ensaio tribológico com material particulado de nanopartículas de Fe_3O_4 : (a) detalhe da superfície, bolhas solidificadas resultantes do processo de eletroerosão com marcas de abrasão 500x, (b1;b2) detalhe da microestrutura dendrítica; 25.000x.51

Figura 49. – Micrografias ópticas ferro fundido cinzento: (a) amostra original, (b) amostra tratada com laser (22).56

Figura 50. – Micrografias ópticas ferro fundido cinzento: (a) após tratamento de arco de plasma, (b) detalhe dos precipitados refinados de grafita (24).57

- Figura 51. – Ferro fundido cinzento irradiado por elétrons de alta energia.
Transformações de fase. Microscopia óptica. Adaptado de (25).....58
- Figura 52. – Microscopia óptica de ferro fundido cinzento irradiado por elétrons de alta energia. (a) região fundida; (b) região fundida/transformada; (c) região com transformação de fase; (d) região parcialmente transformada. Adaptado de (25).....59
- Figura 53. – Microscopia óptica de ferro fundido branco, composto por perlita (escura) e ledeburita transformada (clara): cementita (branco) e perlita (escura, pequenos pontos). Ataque Nital (26).60

Lista de Tabelas

Tabela 1. – Classificações comerciais dos ferros fundidos, adaptação de (1).	2
Tabela 2. – Dados de rugosidade antes dos ensaios tribológicos das amostras planas de ferro fundido cinzento.	24
Tabela 3. – Dados de rugosidade após os ensaios tribológicos das amostras planas de ferro fundido cinzento contra anéis de aço, em comparação com os parâmetros de rugosidade anteriores aos ensaios.	27
Tabela 4. – Coeficiente de atrito durante os ensaios tribológicos. Coeficiente total (0 a 10.000 ciclos) X Coeficiente parcial (últimos 5.000 ciclos).	34

Lista de Abreviaturas e Siglas

GGg	Amostra plana de ferro fundido de 40 mm de diâmetro; superfície lixada
GGe1	Amostra plana de ferro fundido de 40 mm de diâmetro; superfície eletroerodida
GGe2	Amostra plana de ferro fundido de 40 mm de diâmetro; superfície eletroerodida
GGe3	Amostra plana de ferro fundido de 40 mm de diâmetro; superfície eletroerodida
FIB	Feixe de elétrons focalizados
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
EDM	Eletroerosão submersa
WEDM	Eletroerosão a fio
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CAD	Desenho auxiliado por computador

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. FERRO FUNDIDO	2
2.1.1. FERRO FUNDIDO CINZENTO.....	4
A) RESISTÊNCIA AO DESGASTE	7
B) MICROESTRUTURA	9
2.2. PROCESSO DE USINAGEM POR ELETROEROSÃO.....	10
2.3. RUGOSIDADE SUPERFICIAL	13
2.4. ENSAIOS TRIBOLÓGICOS	14
3. OBJETIVOS	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1. AMOSTRAS	17
4.2. PROCESSO DE ELETROEROSÃO (EDM).....	17
4.3. ENSAIOS TRIBOLÓGICOS	18
4.4. MICROSCOPIA POR FEIXE DE ÍONS FOCALIZADOS (FIB).....	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
5.1. PERFIL DE RUGOSIDADE DAS AMOSTRAS ANTES DOS ENSAIOS TRIBOLÓGICOS.....	22
5.2. PERFIL DE RUGOSIDADE DAS AMOSTRAS APÓS ENSAIOS TRIBOLÓGICOS.....	25
5.3. COEFICIENTE DE ATRITO OBTIDOS NOS ENSAIOS TRIBOLÓGICOS	33
5.4. MICROSCOPIAS DE FEIXE DE ÍONS FOCALIZADOS (FIB) DAS AMOSTRAS	38
5.4.1. AMOSTRA SOMENTE LIXADA.....	38
5.4.2. AMOSTRAS COM PROCESSO DE ELETROEROSÃO (EDM SUBMERSO)	41
6. DISCUSSÕES FINAIS.....	53
7. CONCLUSÕES	61
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. Introdução

O processo de eletroerosão tem sido aplicado na indústria como processo de usinagem e no tratamento superficial com alterações da rugosidade superficial de peças. Contudo a possibilidade de alterações de microestruturas possibilita novas aplicações do processo em substituição ou complementação de tratamentos térmicos. O método já é consolidado e seus parâmetros operacionais estão mapeados, possibilitando controle adequado da configuração final da superfície dos objetos de trabalho. Assim é recomendado o estudo de como estes parâmetros atuam nos mecanismos de transformações de fases.

A escolha do ferro fundido cinzento é baseada no grande range de aplicações industriais que este material possui. Esta grande importância que a indústria despende para o material é resultado de suas excelentes propriedades mecânicas, alta usinabilidade, alta fluidez, aliados ao baixo custo e processo simples de fabricação, sem exigência de controles sofisticados de fusão e solidificação.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Ferro fundido

O termo ferro fundido congrega um amplo conjunto de ligas a base de ferro, com presença significativa de carbono e silício em diversas proporções. Enxofre e fósforo também são observados em proporção menor como impurezas residuais, inerentes dos processos de fusão das ligas.

As primeiras classificações das ligas de ferro fundido eram baseadas nos aspectos visuais de suas fraturas. A solidificação estável dos ferros fundidos cinzentos resulta na precipitação de grafita na matriz. Durante as solicitações mecânicas as trincas propagam-se através destas lamelas de grafita, dando o aspecto cinzento à superfície fraturada, após a ruptura do material. Em contra partida, a solidificação dos ferros fundidos brancos ocorre de forma metaestável (Fe_3C eutético), resultando na precipitação de carbonetos de ferro. Da mesma forma, as trincas neste material propagam-se por estes carbonetos, resultando, após a ruptura, um aspecto branco e cristalino à superfície de fratura (1).

Há outras classificações comerciais (tabela 1) de ferro fundido, tais como ferro fundido nodular, ferro fundido maleável e ferro fundido vermicular, contudo neste trabalho serão abordados os ferros fundidos cinzento e branco.

Tabela 1. – Classificações comerciais dos ferros fundidos, adaptação de (1).

Classificação Comercial	Fase rica em Carbono	Estrutura da matriz	Aspecto da Fratura	Processos de fabricação
Ferro fundido cinzento	Grafita lamelar	Perlítica	Cinza	Solidificação
Ferro fundido dúctil	Grafita esferoidal	Ferrítica; Perlítica; Austenitizada	Cinza prateada	Solidificação ou tratamento térmico
Ferro fundido branco	Carboneto de ferro (Fe_3C)	Perlítica; Martensítica	Branca	Solidificação e tratamento térmico

Nos ferros fundidos a composição química dos principais elementos está na faixa de 4% de carbono e 3% de silício, a figura 1 apresenta estas faixas. Os ferros fundidos apresentam teor de carbono que o maior o limite de solubilidade na

austenita, mostrado pela linha A. O aumento do teor de C favorece a precipitação de grafita (acima de 2,5% C) ou formação de carbonetos de ferro (acima de 2,0% C). Aliando o aumento dos teores de C ao aumento de Si, a precipitação de grafita é potencializada, proporcionando melhor usinabilidade a liga resultante.

Stefanescu (1) considera que durante a solidificação eutética das ligas ferro-carbono o potencial de nucleação do líquido tem influencia nas características finais da peça sólida. As variações da composição química da liga, da taxa de resfriamento do banho e seu respectivo tratamento direcionarão a nucleação para o sistema metaestável (Fe - Carboneto de ferro) ou para o sistema estável (Fe - Grafita).

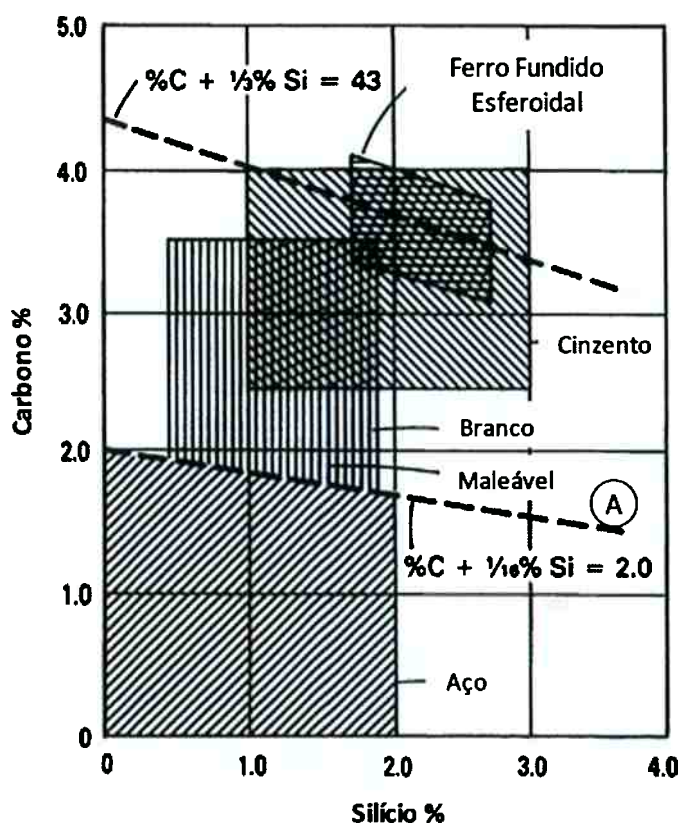


Figura 1. – Ferros fundidos: teores de C e Si na composição da liga, em percentual e influências na estrutura da matriz. Adaptado de (1).

2.1.1. Ferro fundido cinzento

As ligas de ferro fundido cinzentos são amplamente utilizadas em face de sua produção simples e baixo custo. Geralmente são obtidas pela solidificação de ferro gusa com adição opcional de sucatas de ferro no banho. Outros motivos que incentivam a utilização de ferro fundido cinzento são: boa usinabilidade (presença de veios de grafita) e alta fluidez durante a fundição (permitindo o preenchimento de moldes mais finos e de geometria complexa).

Como dito anteriormente, os ferros fundidos possuem teores de carbono acima do limite de solubilidade na austenita na temperatura eutética. No caso dos ferros fundidos cinzentos este excesso de carbono precipita em forma de grafita lamelar (2).

Esta grafita precipita em forma de um reticulado cristalino hexagonal compacto e seu crescimento só é permitido nas direções paralelas ou perpendiculares ao plano Basal (direções A, C da figura 2) ou por empilhamento de placas nas faces prismáticas das células unitárias.

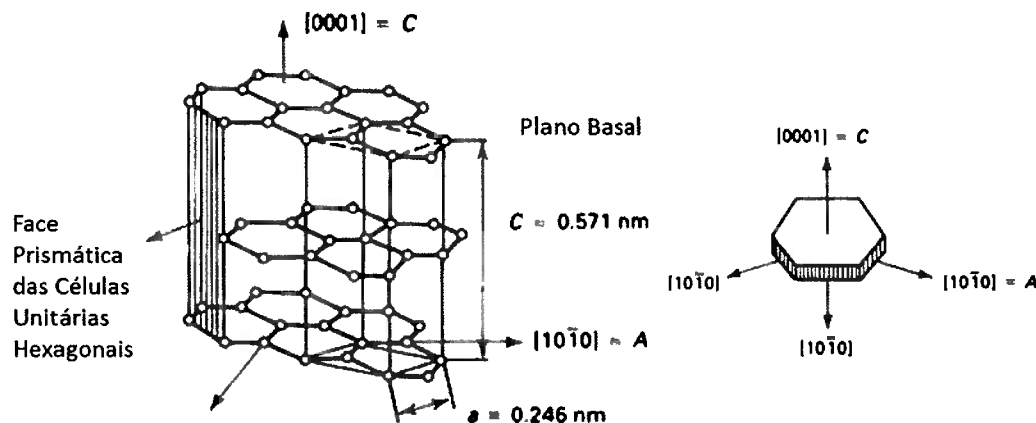


Figura 2. – Reticulado cristalino hexagonal da grafita. Adaptado de (3).

A classe de ferros fundidos cinzentos possui usualmente uma microestrutura de matriz perlítica com precipitados dispersos de grafita. As amostras tratadas neste trabalho apresentam inicialmente estas características, pois após o processo de eletroerosão algumas amostras apresentaram alterações microestruturais. Especificamente, na amostra GGe3 observa-se a presença de camada superficial que

sofreu fusão incipiente seguida de rápida solidificação, verificando-se inclusive a presença de dendritas.

A morfologia e crescimento dos precipitados de grafita são influenciados pela taxa de resfriamento durante a fundição destas ligas de ferro fundido. Um resfriamento rápido é capaz de produzir o denominado comercialmente como ferro fundido coquilhado, que apresenta grandes carbonetos de ferro. Utilizando um taxa de resfriamento intermediária o carbono estará presente na forma de cementita primária (carboneto de ferro) e grafita, produzindo o ferro fundido mesclado. Já coligando baixas taxas de resfriamento com altos teores de silício e carbono é possível produzir matrizes compostas de ferrita e perlita com precipitados grosseiros de grafita (2).

A classificação dos precipitados de grafita é indicada pela norma ASTM A 247, segundo parâmetros definidos e tendo o tamanho auferido segundo gráfico padrão com oito tamanhos distintos de grafita para comparação no aumento x100. Segundo White (2) o tipo A (figura 3) tem a morfologia mais adequada a grande maioria das aplicações, pois a presença de precipitados de distintas magnitudes intermediárias permite uma melhor proteção ao desgaste por atrito.

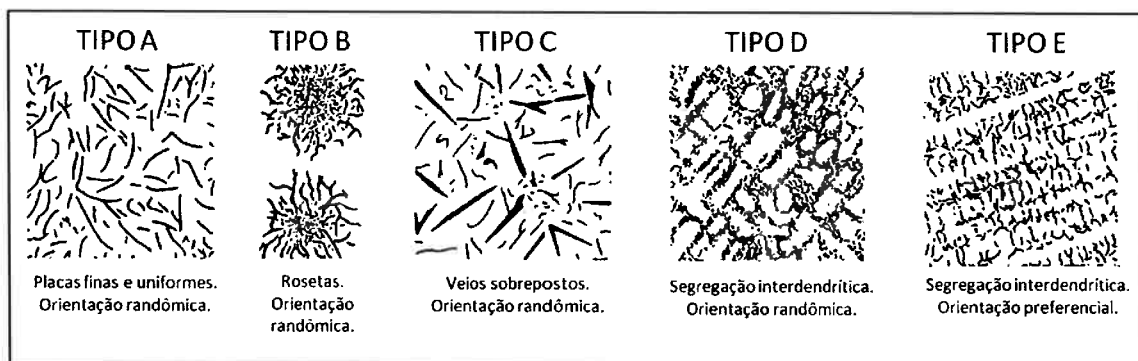


Figura 3. – Tipo de precipitados de grafita em ferros fundidos cinzentos, segundo norma ASTM (aumento de 100x, redimensionados). Adaptado de (2).

Durante o resfriamento da liga a transformação eutética dependerá da taxa de resfriamento e da composição química da austenita. Em geral a austenita irá transformar-se em perlita, ou em ferrita com precipitados de grafita em casos de resfriamentos lentos, pois a velocidade de migração do carbono presente na austenita

é baixa (2). Nestes casos a velocidade de resfriamento da liga determinará a espessura destes precipitados de forma inversa, ou seja, quanto menores as velocidades de resfriamento, maiores os precipitados de grafita (4) (5) (6).

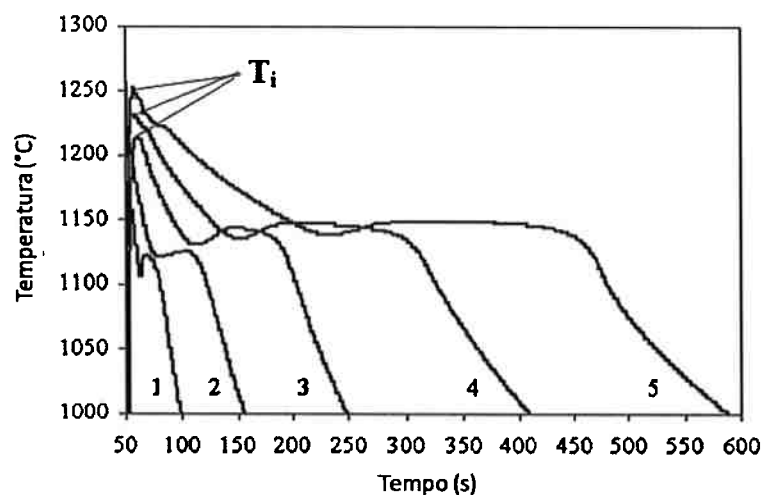


Figura 4. – Curvas de resfriamento para ferro fundido e espessuras dos precipitados de grafita. Espessura 0,6/1,0/1,6/2,2/3,0 cm de 1 a 5 respectivamente. Adaptado de (5).

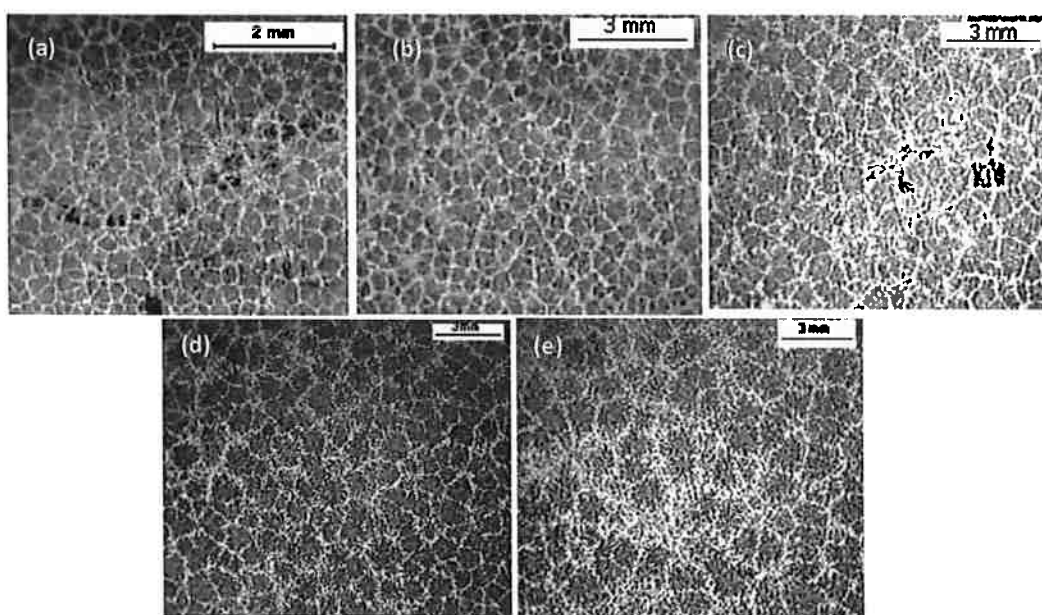


Figura 5. – Micrografias de grafitas (cor cinza) em matriz de ferro fundido, espessuras: 0,6/1,0/1,6/2,2/3,0 cm de (a) a (e) respectivamente. Reagente Stead. Adaptado de (5).

a) Resistência ao desgaste

A resistência ao desgaste tem grande importância para qualquer aplicação que possua duas superfícies em contato. Há relação indireta entre a dureza relativa entre estas superfícies e o desgaste por contato. Em geral maiores durezas relativas resultam em maiores desgastes. Stefanescu (1) considera a dureza relativa menor de 10 pontos na escala Brinell como ideal para melhores resistências ao desgaste. Um dos principais objetivos do estudo da Tribologia é o estudo deste desgaste por contato, observando a formação do tribofilme que se forma com partículas desprendidas pela abrasão das superfícies ou pela adição de óxidos como materiais particulados. Esta observação e estudo do tribofilme tem como consequência a busca pela minimização do desgaste por contato. São definidos quatro tipos de desgaste: cortante, abrasivo, aderente e corrosivo (7).

O desgaste cortante é resultado da remoção mecânica (corte) de uma das superfícies em razão da rugosidade da outra superfície. O movimento pode ser entendido como um corte superficial, conforme figura 6 (1) (7).

O desgaste abrasivo é motivado pela ação de partículas abrasivas desprendidas das superfícies em contato. Estas partículas eventualmente podem também incorporarem-se novamente ao material (1) (7).

O desgaste por adesão está relacionado ao contato entre duas superfícies metálicas que devido ao atrito lidam com micro processos de soldagem. Com a continuidade do movimento da fricção (com ou sem material particulado adicionado) entre as superfícies estas regiões soldadas são desprendidas, ocasionando grandes perdas de material e consequentemente maiores desgastes superficiais (1) (7).

Já o desgaste corrosivo é uma combinação do processo abrasivo ou por aderência com características corrosivas do meio em que se encontram as superfícies. Em geral, para os ferros fundidos cinzento comuns não há alterações que evitem este desgaste (1) (7).

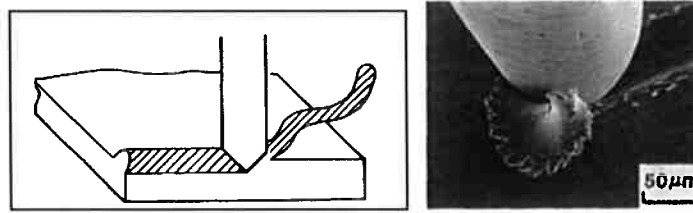


Figura 6. – Exemplo de desgaste cortante. Esquema teórico e processo simulado observado em microscópio eletrônico de varredura (7).

Shuck (8) realizou diversos testes de desgaste com diferentes tipos de ferros fundidos cinzentos, seja por composições químicas ou microestruturas. O teste consistia no contato entre uma pastilha de freio contra um tambor de ferro fundido cinzento. Os resultados indicaram que o desgaste por adesão foi o principal agente durante o processo, embora o desgaste por corte tivesse uma relativa contribuição. As conclusões foram as seguintes:

- A microestrutura do ferro fundido determina as características do desgaste;
- Presença de grafitas do tipo A tendem a diminuir o efeito do desgaste por corte;
- Presença de grafita interdendrítica tipo D em conjunto com matriz ferrítica acarreta em maiores desgastes;
- Ferrita secundária associada à grafita tipo A tem desgaste menor em comparação com associação ao tipo D;
- Microestruturas perlíticas aciculares e martensitas temperadas com mesma faixa de dureza têm a mesma resistência ao desgaste;
- Em matrizes perlíticas e relativamente duras, com um determinado tipo de grafita, o incremento da fração perlítica resulta em maiores resistências a desgaste.

b) Microestrutura

As amostras planas de ferro fundido cinzento tratadas neste trabalho têm matriz com microestrutura perlítica, com veios de grafita tipo A. A perlita não é uma fase e sim um constituinte resultante da reação eutetóide entre as fases ferrita e cementita. Estas fases são combinadas em um determinado padrão lamelar, de tal forma que menores espaçamentos lamelares são obtidos com maiores taxas de resfriamento. Sua formação requer uma lenta solidificação da liga a partir da região de austenita do diagrama de equilíbrio Fe-C (9).

As figuras 7 e 8 mostram respectivamente microscopia óptica e microscopia FIB de amostras de ferro fundidos cinzentos de matriz perlítica com veios de grafita.



Figura 7. – Microscopia óptica: ferro fundido cinzento sem ataque (105x, 100x; 100x), com veios de grafita (escura) (9).

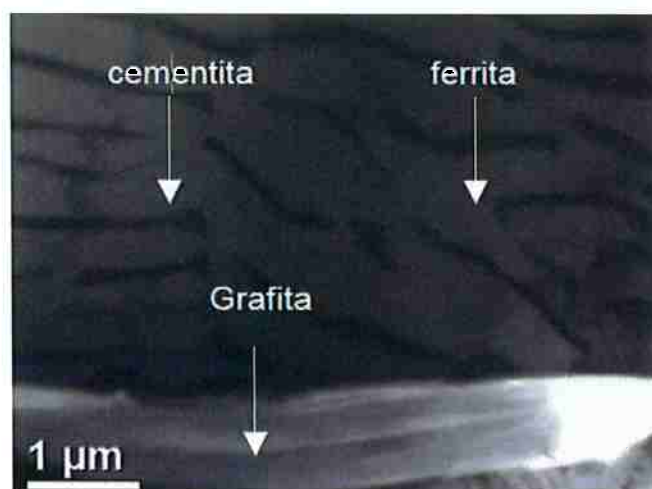


Figura 8. – Microscopia FIB: ferro fundido cinzento perlítico com veios de grafita. Detalhes para as fases ferrita (clara) e cementita (escura), e veio de grafita (10).

2.2. Processo de usinagem por Eletroerosão

O processo de eletroerosão (EDM – *Electro Discharge Machining*) consiste em um processo termoeletrônico que ocorre pela interação entre três elementos: a peça de trabalho, um eletrodo e um fluido de imersão dielétrico. Entre a peça de trabalho e o eletrodo são formados continuamente arcos elétricos concentrados, que fundem ou vaporizam pequenos volumes do objeto de trabalho, sendo removidos continuamente do meio de atuação do arco pelo fluido (11).

Pelo fato do processo ser capaz de remover material da peça de trabalho sem contato físico entre as superfícies de trabalho e de corte, este processo não cria tensões residuais ou induz vibração à peça usinada. Esta característica torna o processo de eletroerosão um processo de usinagem muito útil. A taxa de remoção de material e os parâmetros de rugosidade superficial são influenciados pelos seguintes parâmetros operacionais: corrente elétrica; voltagem; tempos de polaridade e forma do arco elétrico, propriedades do material de trabalho e do eletrodo, propriedades dielétricas do fluido de imersão e formato do eletrodo.

Atualmente existem modelagens algorítmicas capazes de prever o resultado final da superfície usinada das peças com erros menores que 10%. Desta forma, grande maioria dos equipamentos disponíveis no mercado é equipada com módulos de *input* automatizado, capazes de definir automaticamente os parâmetros de trabalho e suas interações (corrente, voltagem, tempos de arco) necessárias para obter as características finais (entre eles a rugosidade) exigidas da peça (12).



Figura 9. – Exemplo de telas do Software da fabricante Sodick (mais de 10.000 condições de usinagem). Inserção de parâmetros de materiais e redução dimensional (13).

Há dois tipos de processos de eletroerosão, o EDM submerso e o EDM a fio (*wire EDM* - WEDM). Ambos possuem o mesmo princípio de operação, contudo no WEDM, o eletrodo consiste num fio condutor de diâmetro até 0,5 mm que se desloca continuamente pela peça de trabalho. A operação de ambos ocorre com a aplicação de uma tensão elétrica através do fluido dielétrico entre a peça de trabalho e o eletrodo, induzindo um campo elétrico nesta região. Isto cessa a característica isolante do fluido e uma corrente elétrica de alta densidade é formada, permitindo o fluxo de elétrons e íons entre o anodo e catodo, resultando no desenvolvimento de uma coluna de plasma, o que inicia a fusão da peça de trabalho. No momento em a tensão é interrompida, a coluna de plasma colapsa e o fluido dielétrico preenche novamente a região, expelindo parte do material fundido, o restante é solidificado na superfície da peça de trabalho (11).

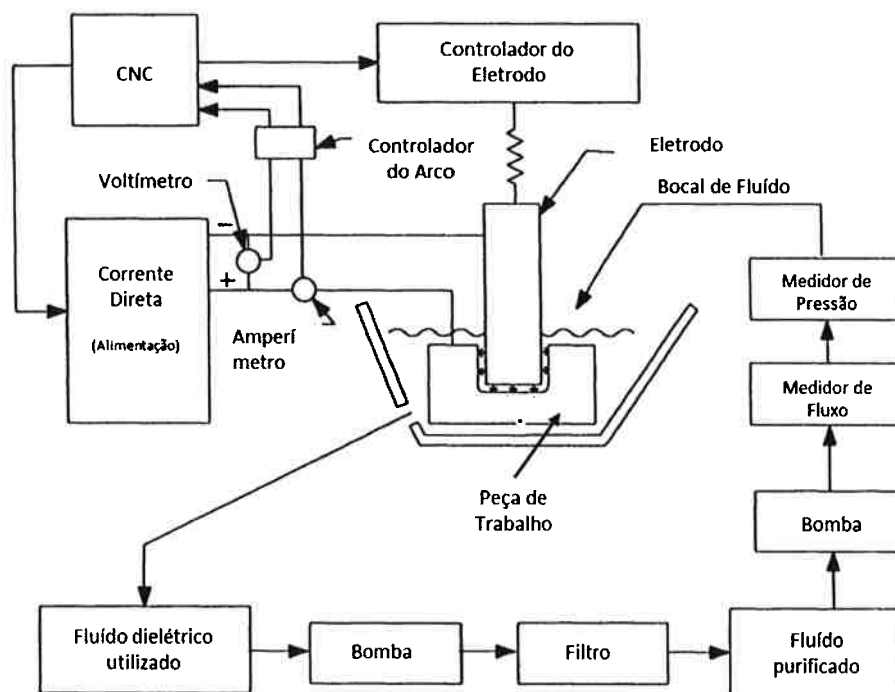


Figura 10. – Diagrama do processo de eletroerosão (EDM - *Electro Discharge Machining*) (11).



Figura 11. – Flúido dielétrico durante processo de eletroerosão. Integração do CNC com software de CAD. Exemplos peças usinadas por eletroerosão (13).

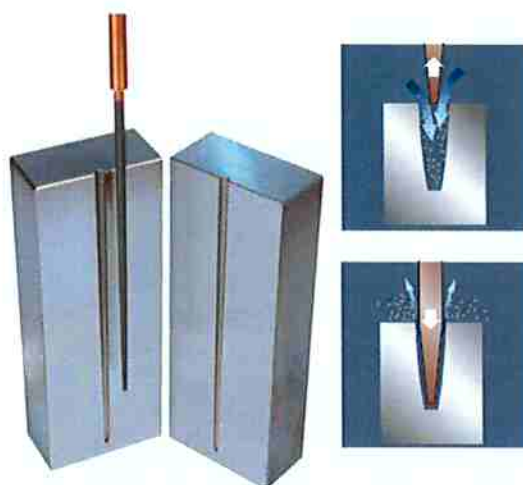


Figura 12. – Processo de eletroerosão: eletrodo tipo lança, e retirada de material fundido da cavidade usinada (13).

2.3. Rugosidade superficial

A rugosidade superficial representa a textura das superfícies. Sua medição analisa a nível microscópico os perfis topográficos dos materiais analisados. Atualmente sua medição é realizada automaticamente através de equipamento medidores de rugosidade disponíveis no mercado. Estes apresentam os parâmetros de rugosidade e os perfis topográficos das superfícies analisadas, conforme modelo de equipamento escolhido.

Dois parâmetros de rugosidade são considerados primordiais, o Ra (média de rugosidade) e Rz (amplitude média máxima do perfil). O Ra consiste na rugosidade média aritmética de todo perfil, sem distinção entre picos e vales, tendo portanto um caráter generalista. Conhecendo-se o perfil topográfico da superfície, o parâmetro Ra pode ser calculado conforme integral da figura 13. Já o parâmetro Rz é calculado através da média aritmética das cinco máximas amplitudes, medidas entre os maiores picos e maiores vales subsequentes, conforme figura 14.

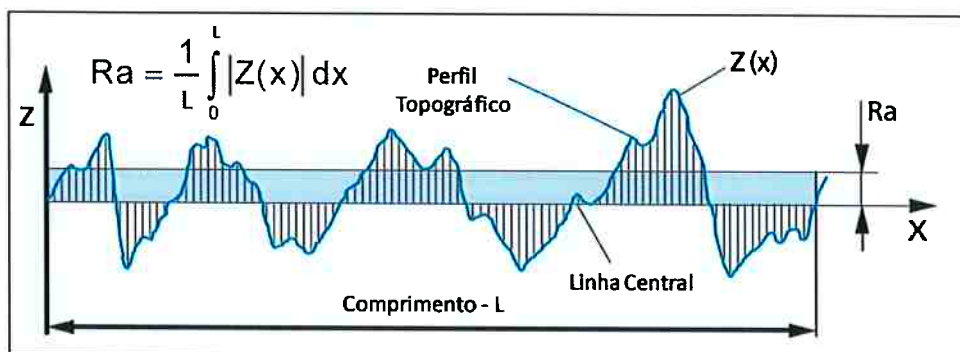


Figura 13. – Parâmetro de rugosidade média Ra (14).

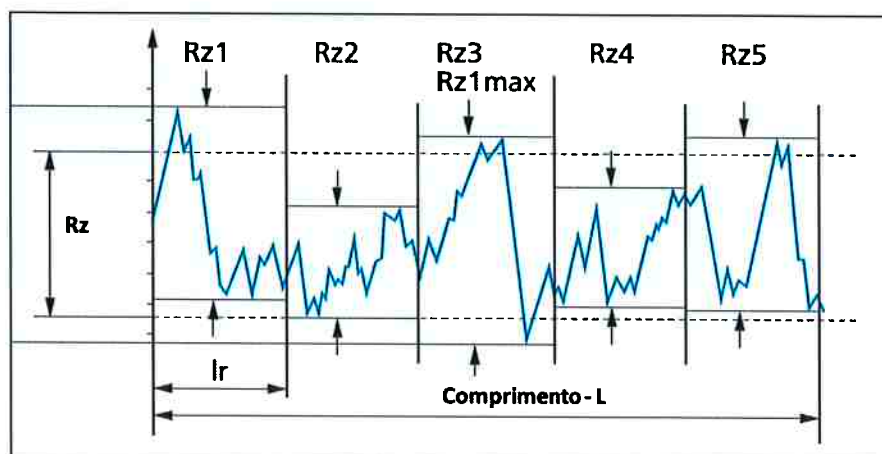


Figura 14. – Parâmetro de amplitude média máxima Rz (14).

2.4. Ensaios tribológicos

Os estudos tribológicos têm como objetivo a análise da interação entre superfícies em movimento, focando em temas como atrito, desgaste e lubrificação. A introdução de lubrificação no meio de contato entre as superfícies busca reduzir os efeitos dos dois primeiros temas, contudo dificilmente chegará a extingui-los por completo, pois estes são causados por elaboradas e múltiplas interações a nível microscópico entre as superfícies que estão em contato.

Estas interações são em decorrência dos tipos de materiais, das características geométricas e das características dos perfis topográficos das superfícies, além das condições do meio em que as superfícies estão presentes, carregamento, temperatura, característica da atmosfera (corrosivo-abrasiva). Assim todas estas variáveis afetam o tipo de interação das superfícies e suas características tribológicas, portanto previsões e modelagens de atrito e desgaste são complexas (15).

Na grande maioria das interações superficiais a área real de contato é muito menor comparada com a área total das superfícies em contato dos objetos. O contato real geralmente ocorre em pequenas porções locais da área total e, portanto o carregamento é totalmente aplicado nestas pequenas frações de área. Isto acarreta em altas pressões e tensões de cisalhamento, por vezes muito além do limite de elasticidade dos materiais, ocasionando em picos de temperatura (podendo haver fusão e rápida solidificação) e elevados graus de deformação, pontuais (15).

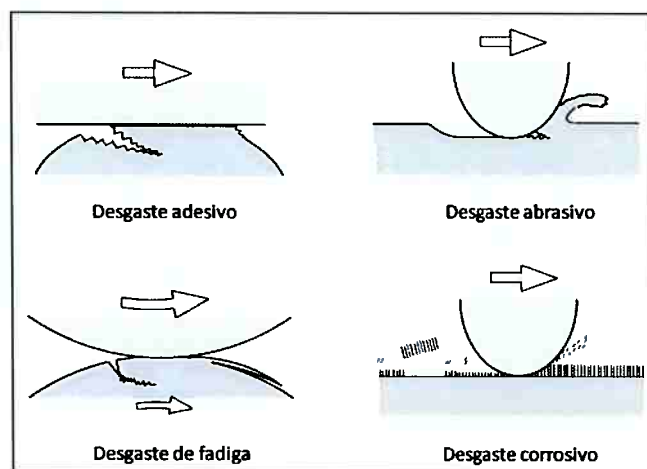


Figura 15. – Tribologia: Tipos de desgastes (16).

Outras variáveis estão presentes durante as interações superficiais, tais como camadas de óxidos (camada passivadora do alumínio), contaminantes (óxidos, partículas abrasivas, partículas do próprio desgaste) e transformações de fases locais. Consequentemente, as propriedades dos materiais durante estas interações superficiais podem diferir das propriedades tabeladas na literatura ou até mesmo de testes práticos de larga escala. Assim a realização dos ensaios tribológicos tem grande fundamento para simular os parâmetros de atrito e de desgaste da interação superficial, devendo ser incluídos no processo de desenvolvimento e seleção de materiais.

São encontrados na literatura quatro tipos principais de ensaios tribológicos, conforme figura 16. Três (a, b e c) consistem na utilização de um pino com carregamento normal (N) contra uma superfície, todas são configurações comuns e amplamente utilizadas segundo padrão industrial da Alemanha. Outra (d) consiste na utilização de um bloco pressionado em caráter abrasivo contra um disco giratório, esta configuração é utilizada nos Estados Unidos da América, segundo a norma ASTM G65 (15).

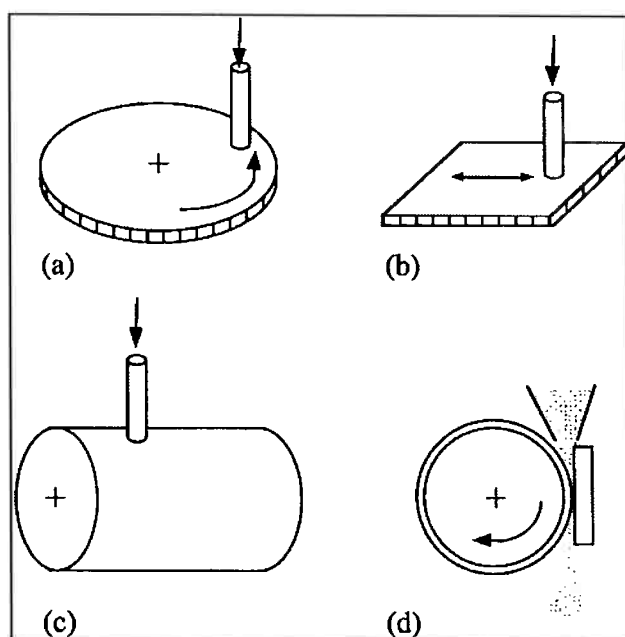


Figura 16. – Tribologia: tipos de ensaios. (a) pino a disco; (b) pino sobre chapa (c) pino a tambor; (d) bloco contra disco (15).

3. Objetivos

O trabalho tinha como objetivo aplicar o processo de eletroerosão para obter diferentes rugosidades em amostras de ferro fundido cinzento de matriz perlítica para os ensaios tribológicos. Contudo os resultados dos ensaios tribológicos de algumas amostras não puderam ser interpretados devido a desvios de resultados em comparação com as outras e com o previsto em literatura. Assim foi necessária a utilização de análise microestrutural usando microscopias de feixe de íons focalizados (FIB) com elétrons secundários. Os ensaios de caracterização microestrutural indicaram a ocorrência de importante alteração microestrutural nas amostras após eletroerosão. Portanto este trabalho irá apresentar estes resultados e discuti-los, verificando a possibilidade de usar o processo de eletroerosão como um processo de tratamento de superfície.

4. Materiais e Métodos

4.1. Amostras

As amostras utilizadas nos ensaios foram quatro discos de 40 mm de diâmetro de ferro fundido cinzento de matriz perlítica, mostrados na figura 17. O primeiro destes (da esquerda para a direita) teve sua superfície lixada (GGg) e os outros três foram submetidos ao processo de eletroerosão (da esquerda para direita: segundo-GGe1; terceiro-GGe2; quarto-GGe3) com o objetivo de obter valores crescentes das rugosidades entre estas amostras.



Figura 17. – Discos de ferro fundido após eletroerosão. Da esquerda para direita: disco lixado (GGg), eletroerodido-1 (GGe1), eletroerodido-2 (GGe2) e eletroerodido-3 (GGe3).

4.2. Processo de Eletroerosão (EDM)

O processo de eletroerosão foi aplicado com a utilização do equipamento modelo AG60L da empresa de origem japonesa Sodick, segundo a configuração de EDM submerso.

O processo de eletroerosão (EDM submerso) foi aplicado em diversos passes por toda a superfície das amostras planas GGe1, GGe2 e GGe3. A programação do equipamento foi realizada para considerar o material de trabalho como ferro fundido cinzento, com 40 mm de diâmetro. Os perfis de rugosidade foram escolhidos com o objetivo de obter valores crescentes, segundo tabela 2. Os parâmetros de programação para operação do equipamento, tais como corrente, tensão e tempos de arco foram ajustados automaticamente pelo software do fabricante, conforme base de dados protegida por direitos de propriedade.



Figura 18. – Equipamento de eletroerosão (EDM submerso) modelo AG60L, fabricante Sodick.

4.3. Ensaios tribológicos

Os ensaios tribológicos foram realizados nas quatro amostras planas de ferro fundido (GGg, GGe1, GGe2 e GGe3) de 40 mm. Em cada ensaio, uma amostra foi fixada na base do tribômetro e um anel de aço de 10 mm foi disposto em sua superfície superior. Neste anel foi aplicada uma força normal constante, pressionando anel de aço contra a amostra plana (disco). O princípio do teste utilizado é equivalente ao tipo de ensaio tribológico representado na figura 16-b.

Para cada amostra plana foram realizados dois ensaios utilizando adições de materiais particulados distintos. A localização do tipo de adição utilizada em cada amostra, nas figuras 26, 28, 29, 30 e 31 segue o seguinte sistema de identificação por sinais visuais superficiais:

- (1) Adição de nanopartículas de óxido de ferro (Fe_3O_4) com adição de 30% de grafita
- (2) Adição de nanopartículas de óxido de ferro (Fe_3O_4)

Cada ensaio consistiu na translação do anel de aço, com carregamento normal, pela superfície das amostras planas segundo os seguintes parâmetros:

- Temperatura ambiente: 27,3 °C
- Umidade: 54,7%
- Força Normal: 60 N
- Frequência de oscilação: 5 Hz
- Número de ciclos: 10.000
- Amplitude de translação do anel: 6,2 mm

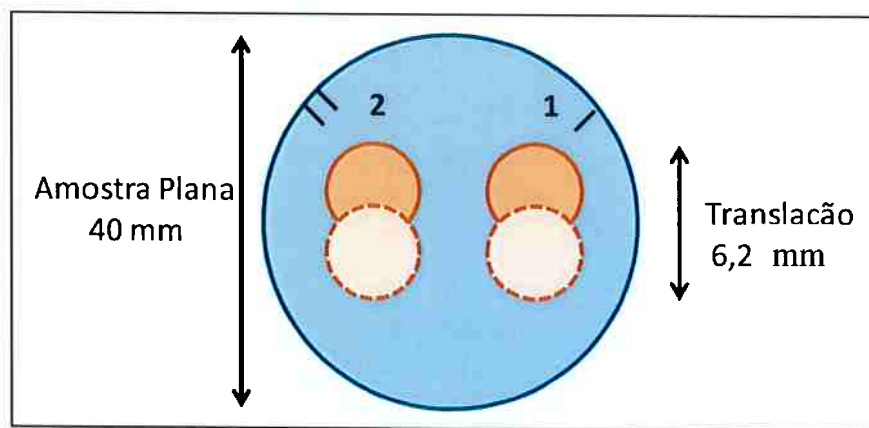


Figura 19. – Condição dos ensaios tribológicos. (1) nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de 30% grafita; (2) nanopartículas de Fe_3O_4 .

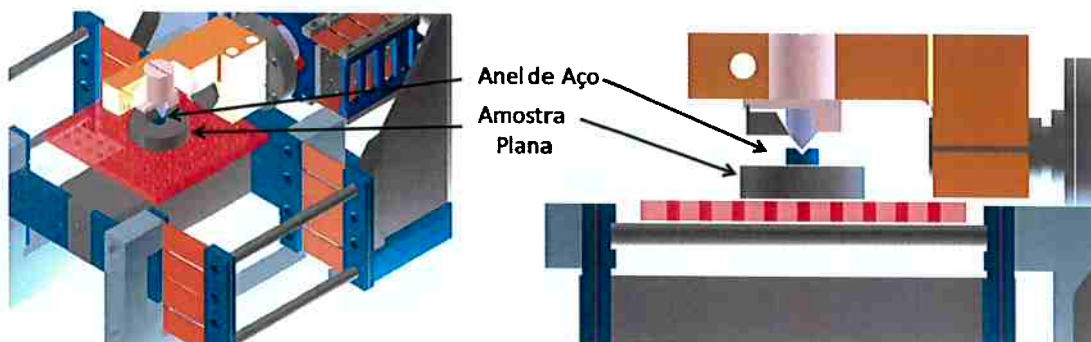


Figura 20. – Perfis do ensaio tribológico. Posicionamento da amostra e do anel de aço no equipamento.

A força normal mantida constante (F_n) e a força tangencial de atrito (F_{at}) foram medidas constantemente, respectivamente por célula de carregamento e piezômetros. O coeficiente de atrito (Cof) foi obtido pelo quociente entre a força normal (F_n) pela força de atrito (F_{at}) (17).

4.4. Microscopia por feixe de íons focalizados (FIB)

Para análise microestrutural das amostras foi utilizada a técnica de microscopia por feixe de íons focalizados (FIB) com elétrons secundários, pois além desta técnica permitir a visualização topográfica das amostras, também é capaz de revelar a microestrutura através de diferenças de contraste.

O método de microscopia por feixe de íons focalizados (FIB) opera de modo similar a microscopia eletrônica de varredura (MEV), porém o FIB utiliza um feixe de íons de Gálio (Ga) ao contrário do feixe de elétrons. A interação do feixe com a amostra sólida em análise pode acarretar diversas consequências: reflexão de íons; emissão de elétrons; emissão de radiação eletromagnética; incorporação de íons do feixe na amostra; emissão de íons; danos a amostra e aquecimento. A técnica pode ser utilizada para aquisição de imagens, para microusinagem ou para deposição direta de metais na superfície da amostra analisada (18) (10).



Figura 21. – Exemplo de FIB: (a) microusinagem (cavidades) e deposição de camada de platina; (b) detalhe a amostra de 12 μm a ser retirada para análise (10).

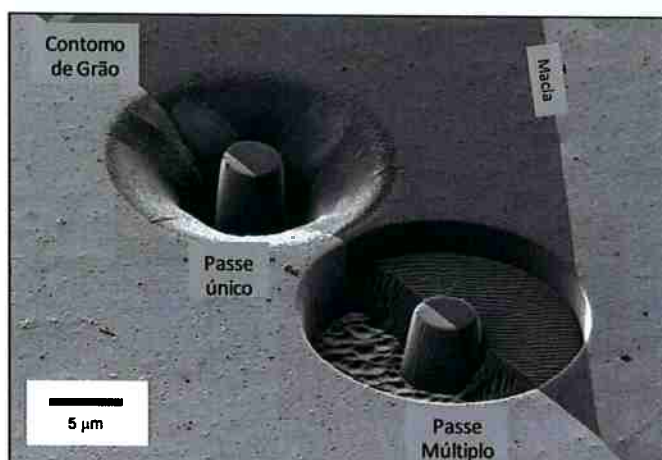


Figura 22. – Cavidades usinadas por FIB: aplicação de passe único e múltiplos passes (18).

Para evitar danos nas amostras causados pelo feixe de íons é depositada uma camada de platina de aproximadamente 30 μm de comprimento por 5 μm de largura. Estes danos podem ser controlados para abrir cavidades nas amostras revelando o interior da amostra sem aplicação de tensões residuais como outros métodos de usinagem, tais como corte. Desta maneira o processo FIB é utilizado como micro/nano processo de usinagem.

Nos equipamentos FIB sensores captam a emissão dos elétrons secundários revelando a superfície em análise, inclusive a orientação dos grãos, podendo ser utilizado para visualizar os contrastes dos contornos de grãos sem necessidade de ataques químicos (19).

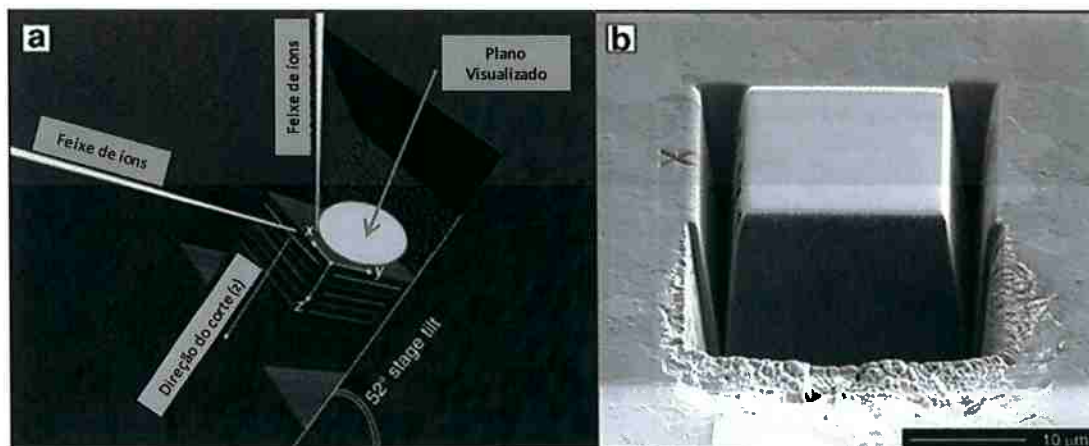


Figura 23. – Processo FIB: (a) modelo de visualização; (b) exemplo de amostra usinada (19).

5. Resultados e Discussões

5.1. Perfil de rugosidade das amostras antes dos ensaios tribológicos

O perfil topográfico dos discos de ferro fundido cinzento de matriz perlítica foi obtido após o processo de lixamento da amostra GGg e o processo de eletroerosão das amostras GGe1, GGe2 e GGe3, segundo a norma ISO 11.562, obtendo-se os perfis apresentados nas figuras 24, 25, 26 e 27.

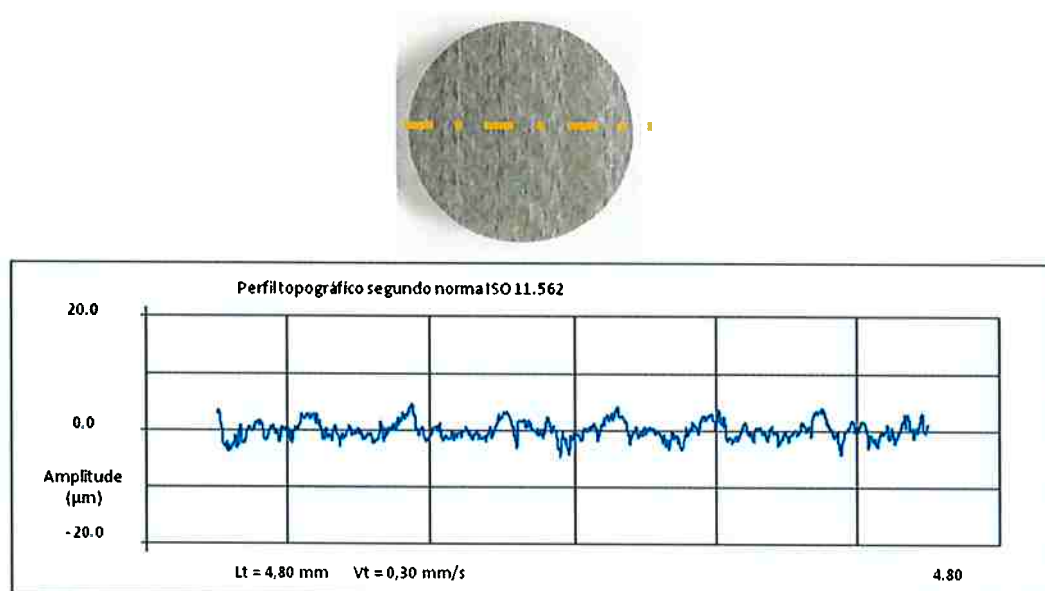


Figura 24. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido lixado; GG_g; antes dos ensaios tribológicos.

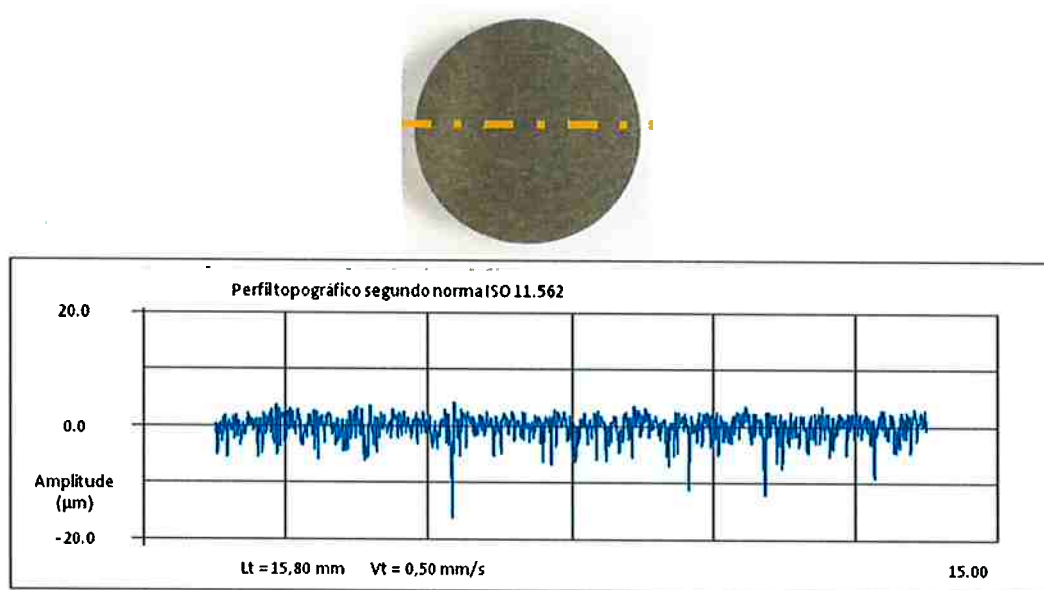


Figura 25. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido eletroerodido; GG_e1; antes dos ensaios tribológicos.

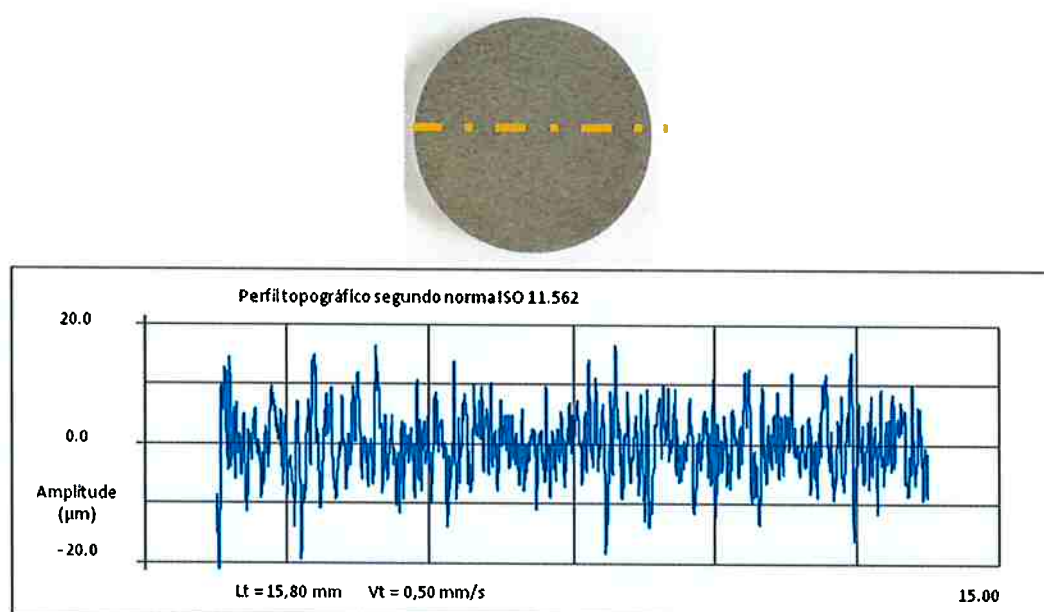


Figura 26. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido eletroerodido; GG_e2; antes dos ensaios tribológicos.

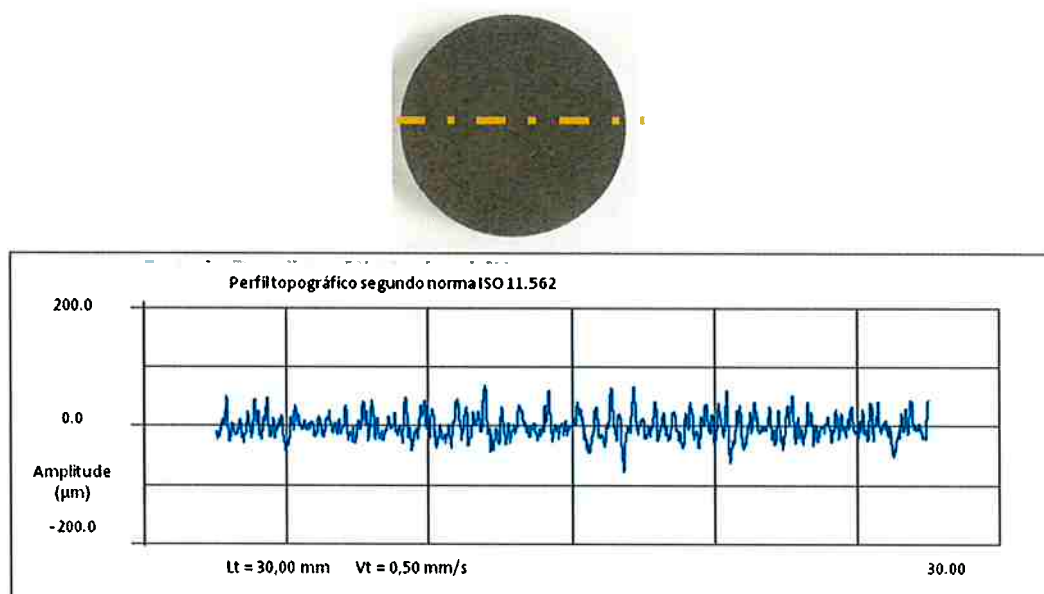


Figura 27. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido eletroerodido; GGe3; antes dos ensaios tribológicos.

A rugosidade dos discos GGe1, GGe2 e GGe3 foi predeterminada durante o *setup* do equipamento de eletroerosão. A programação tinha como objetivo obter amostras com parâmetros de rugosidades crescentes, resultando nos parâmetros de rugosidade conforme tabela 2.

Tabela 2. – Dados de rugosidade antes dos ensaios tribológicos das amostras planas de ferro fundido cinzento.

Disco	Ra (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Rvk (μm)	Mr1 (%)	Mr2 (%)
GGe	1,1	7,2	8,1	1,3	3,8	1,4	10,6	90,5
GGe1	1,5	12,4	17,1	0,8	3,9	3,5	5,0	80,5
GGe2	4,5	31,2	34,7	5,8	14,0	6,2	12,1	89,5
GGe3	17,0	110,3	132,8	23,9	53,9	18,1	13,0	91,6

Os perfis crescentes de rugosidade foram obtidos (figura 28), evidenciando que a técnica de eletroerosão é capaz de alterar o perfil topográfico superficial das amostras de ferro fundido cinzento analisadas.

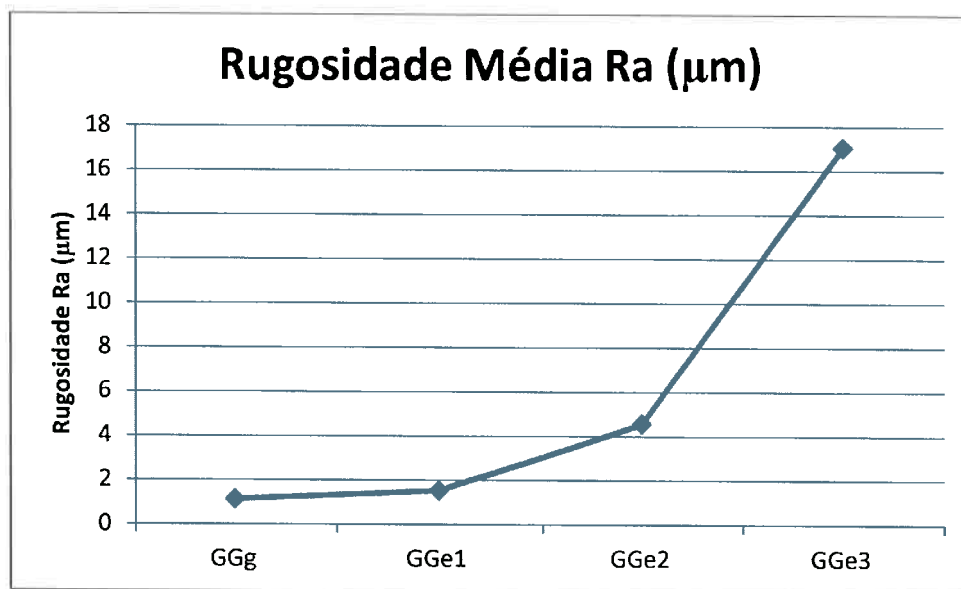


Figura 28. – Dados de rugosidade média (Ra) antes dos ensaios tribológicos das amostras planas de ferro fundido cinzento.

5.2. Perfil de rugosidade das amostras após ensaios tribológicos

Os ensaios tribológicos consistiram na translação com fricção do anel de aço, com carregamento normal, pela superfície das amostras planas de ferro fundido cinzento de matriz perlítica segundo os seguintes parâmetros:

- Temperatura ambiente: 27,3 °C
- Umidade: 54,7%
- Força Normal: 60 N
- Frequência de oscilação: 5 Hz
- Número de ciclos: 10.000
- Amplitude de deslocamento do anel: 6,2 mm

Para cada amostra plana (disco) de ferro fundido cinzento foram realizados dois testes utilizando materiais particulado distintos: nanopartículas de Fe_3O_4 com grafita / nanopartículas de Fe_3O_4 (somente). A figura 29 apresenta o resultado macro após os ensaios tribológicos. É possível notar nas amostras eletroerodidas desgaste mais acentuado presente na região que foi utilizada nanopartículas de Fe_3O_4 com grafita como material particulado (regiões 1) e desgastes não uniformes na região que foi utilizado somente nanopartículas de Fe_3O_4 como material particulado (regiões 2). Esperava-se maiores desgastes nas regiões que utilizaram o óxido de ferro como material particulado em comparação com o óxido de ferro com adição de grafita, tendo em vista maior característica abrasiva deste óxido em relação ao óxido com adição de grafita.



Figura 29. – Discos de ferro fundido cinzento. Da esquerda para direita: disco lixado (GGg), eletroerodido-1 (GGe1), eletroerodido-2 (GGe2) e eletroerodido-3 (GGe3). Material particulado: 1: Fe_3O_4 + 30% grafita / 2: Fe_3O_4 .

Novamente foram medidos os parâmetros de rugosidade dos discos após os ensaios tribológico. Os resultados são apresentados na tabela 3 e visualizados na figura 30. Novamente é possível verificar-se o perfil crescente de rugosidade entre os três discos eletroerodidos, independente da adição dos materiais particulados, concluindo-se que a eletroerosão foi capaz de alterar os parâmetros de rugosidade. É possível constatar maior rugosidade utilizando-se como material particulado as

nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita em comparação com a utilização somente do óxido nas amostras lixada (GGg) e eletroerodida-3 (GGe3). O comportamento inverso é observado para as outras amostras eletroerodidas 1 (GGe1) e 2 (GGe2). Ambas possuem maior rugosidade utilizando-se somente nanopartículas de Fe_3O_4 , em comparação com a utilização de nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita. Contudo em todas as amostras planas (discos) é possível afirmar que a utilização como material particulado de nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita ou somente nanopartículas de Fe_3O_4 , reduziram a rugosidade das amostras planas de ferro fundido cinzento, após os ensaios tribológicos contra a superfície de aço (anéis).

Tabela 3. – Dados de rugosidade após os ensaios tribológicos das amostras planas de ferro fundido cinzento contra anéis de aço, em comparação com os parâmetros de rugosidade anteriores aos ensaios.

Amostra Plana	Material particulado	Ra (μm)	Rz (μm)	Rmax (μm)	Rpk (μm)	Rk (μm)	Rvk (μm)	Mr1 (%)	Mr2 (%)
GGg (Somente lixada)	Antes do Ensaio	1,1	7,2	8,1	1,3	3,8	1,4	10,6	90,5
	Fe3O4 + 30% C	1,2	7,8	9,9	1,0	3,7	1,7	9,7	88,0
	Fe3O4	0,8	5,9	7,1	0,7	2,3	1,6	6,4	84,4
GGe1 (Eletroerodida-1)	Antes do Ensaio	1,5	12,4	17,1	0,8	3,9	3,5	5,0	80,5
	Fe3O4 + 30% C	0,9	8,8	12,5	1,0	1,5	3,0	10,2	75,9
	Fe3O4	1,1	9,2	11,7	0,7	2,0	3,0	8,3	71,7
GGe2 (Eletroerodida-2)	Antes do Ensaio	4,6	31,2	34,7	5,8	14,0	6,2	12,1	89,6
	Fe3O4 + 30% C	3,7	24,1	30,0	2,8	12,0	5,5	4,9	86,9
	Fe3O4	3,8	24,0	29,8	2,4	12,3	5,6	6,4	87,5
GGe3 (Eletroerodida-3)	Antes do Ensaio	17,0	110,3	132,8	23,9	53,9	18,1	13,0	91,6
	Fe3O4 + 30% C	12,9	74,9	87,0	15,1	43,2	14,0	10,7	90,4
	Fe3O4	11,8	63,8	76,9	12,3	39,3	12,4	10,8	90,9

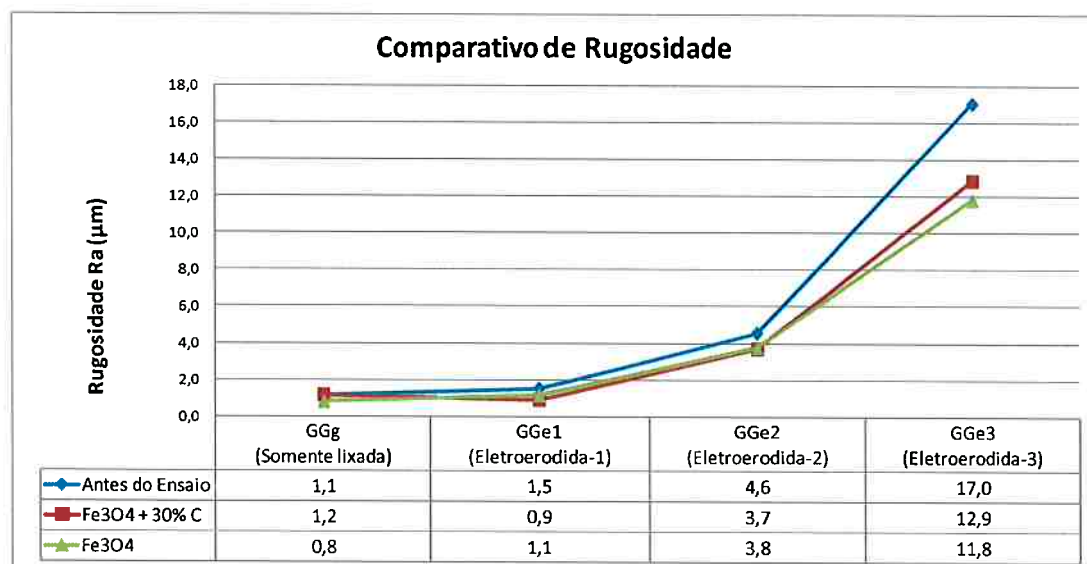


Figura 30. – Comparativo de rugosidade média (Ra) entre os discos GGg, GGe1, GGe2 e GGe3; Materiais particulados: nenhum, nanopartículas de Fe₃O₄ com adição de grafita e Fe₃O₄.

Os perfis topográficos das amostras foram obtidos e são apresentados nas figuras 31(GGg), 32 (GGe1), 33 (GGe2) e 34 (GGe3). Pelos perfis topográficos das amostras GGg (figura 31) e GGe3 (figura 34) é possível verificar novamente que a utilização de nanopartículas de Fe₃O₄ com adição de grafita como material particulado ocasiona em picos e vales de maior amplitude em comparação com a utilização somente de nanopartículas de Fe₃O₄.

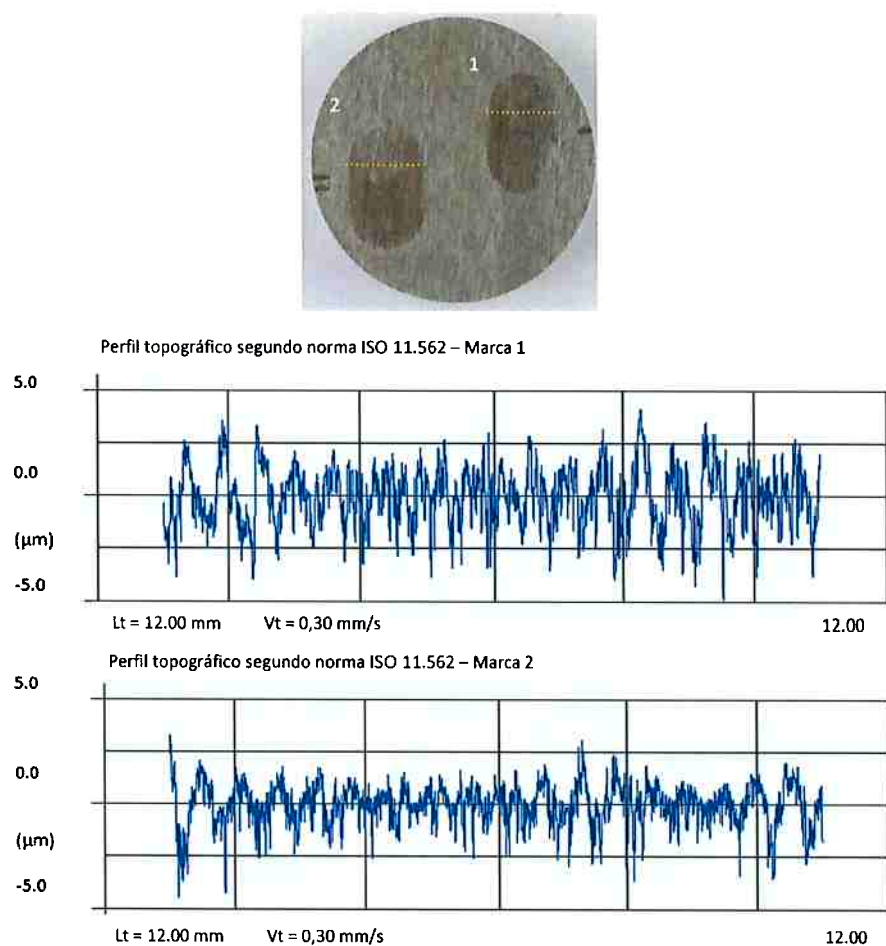


Figura 31. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido lixado (GGg); após ensaios tribológicos. Material particulado: 1: nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita/ 2: nanopartículas de Fe_3O_4 .

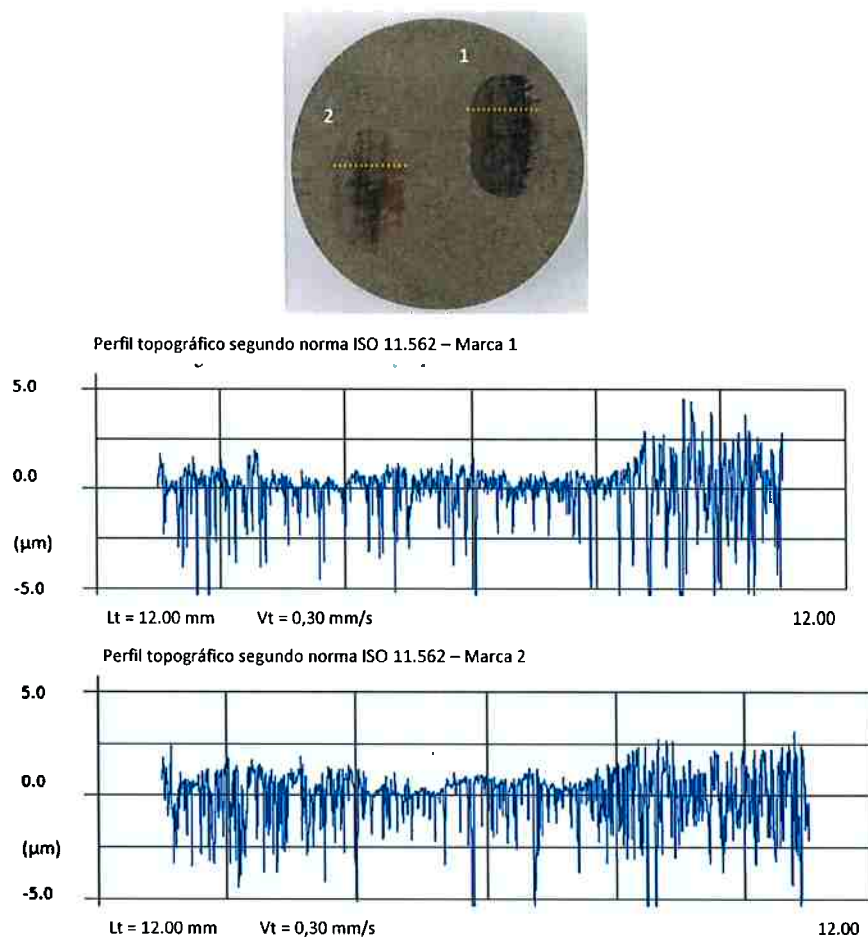


Figura 32. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido eletroerodido-1 (GGe1); após ensaios tribológicos. Material particulado: 1: nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita/ 2: nanopartículas de Fe_3O_4 .

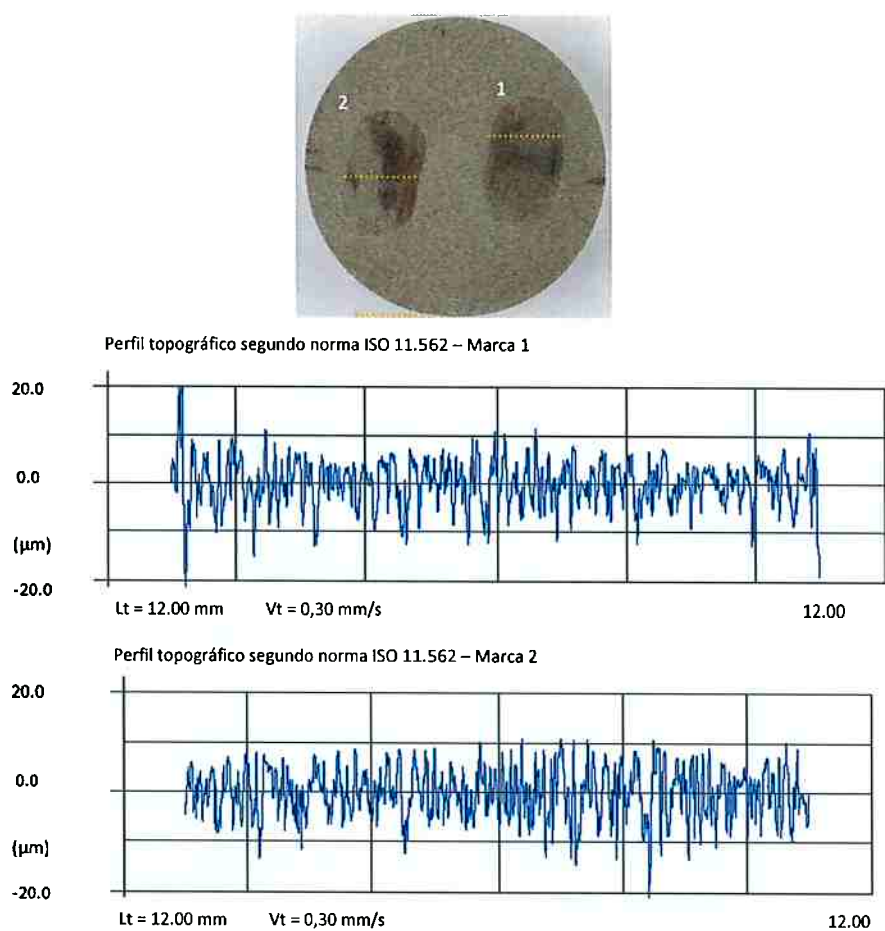


Figura 33. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido eletroerodido-2 (GGe2); após ensaios tribológicos. Material particulado: 1: nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita/ 2: nanopartículas de Fe_3O_4 .

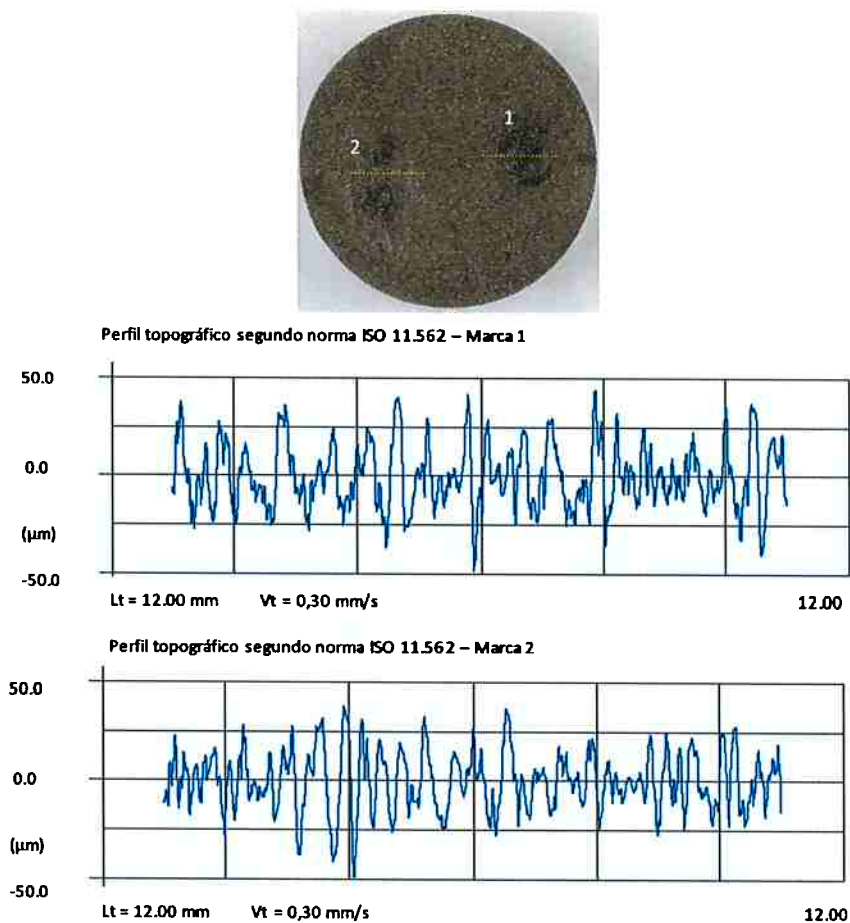


Figura 34. – Perfil topográfico do disco de ferro fundido eletroerodido-3 (GGe3); após ensaios tribológicos. Material particulado: 1: nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita/ 2: nanopartículas de Fe_3O_4 .

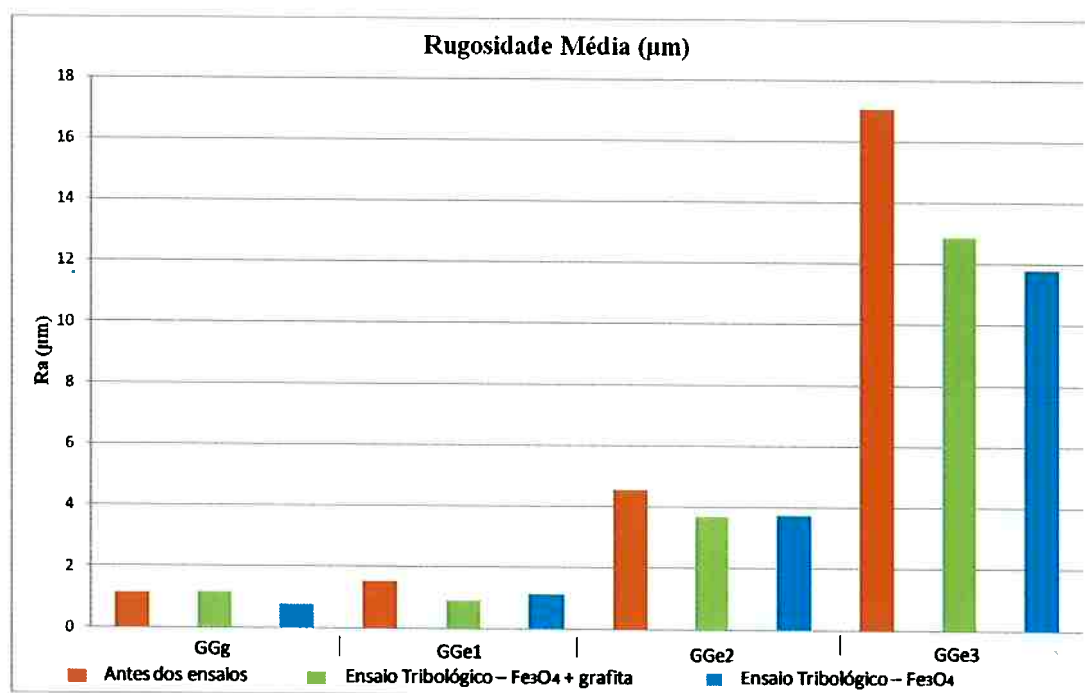


Figura 35. – Rugosidade média (Ra) antes e após os ensaios tribológicos.

Conforme figura 35, a rugosidade das amostras foi reduzida somente com a utilização de nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita ou apenas nanopartículas de Fe_3O_4 .

5.3. Coeficiente de atrito obtidos nos ensaios tribológicos

Os ensaios tribológicos foram realizados utilizando-se as quatro amostras planas (discos) cada uma com tipo distinto de tratamento superficial: sem eletroerosão, eletroerosão-1, eletroerosão-2 e eletroerosão-3. Cada amostra foi utilizada para dois ensaios tribológicos com diferentes tipos de adição de materiais particulados: nanopartículas de Fe_3O_4 e de nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de 30% de grafita. Nestas amostras foram aferidos os Coeficientes de Atrito e seu

desenvolvimento durante os ensaios, as figuras 36 (GGg), 37 (GGe1), 38 (GGe2) e 39 (GGe3) apresentam estes resultados.

Tabela 4. – Coeficiente de atrito durante os ensaios tribológicos. Coeficiente total (0 a 10.000 ciclos) X Coeficiente parcial (últimos 5.000 ciclos).

Amostra Plana	Material Particulado utilizado no ensaio	0 a 10.000 Ciclos		5.000 a 10.000 Ciclos	
		Cof (TOTAL)	Desvio padrão	Cof (últimos ciclos)	Desvio padrão
GGg (lixada)	Fe ₃ O ₄ + 30% C	0,311	0,029	0,335	0,016
	Fe ₃ O ₄	0,485	0,074	0,543	0,025
GGe1 (eletroerodida-1)	Fe ₃ O ₄ + 30% C	0,313	0,037	0,345	0,021
	Fe ₃ O ₄	0,452	0,054	0,497	0,019
GGe2 (eletroerodida-2)	Fe ₃ O ₄ + 30% C	0,367	0,040	0,397	0,015
	Fe ₃ O ₄	0,490	0,026	0,507	0,018
GGe3 (eletroerodida-3)	Fe ₃ O ₄ + 30% C	0,278	0,023	0,270	0,005
	Fe ₃ O ₄	0,562	0,018	0,551	0,004

Para todas as amostras as leituras dos últimos 5.000 ciclos apresentaram menores variações (desvio padrão) do coeficiente de atrito, comparados com os ciclos totais. É provável que isto ocorra devido à uniformização da superfície com o crescimento de ciclos. Nos primeiros ciclos (0 a 5.000 ciclos) a superfície de contato entre os discos de ferro fundido e os anéis de aço é muito irregular. O material particulado (Fe₃O₄ ou Fe₃O₄/grafita) passa a preencher estas irregularidades e em conjunto com o desgaste superficial, reduz a variação (desvio padrão) do coeficiente de atrito entre as superfícies. Com a continuidade dos ensaios tribológicos, forma-se o tribofilme (material particulado em conjunto com material do desgaste das superfícies), que diminuiu em maior intensidade esta variação do coeficiente de atrito entre as duas superfícies.

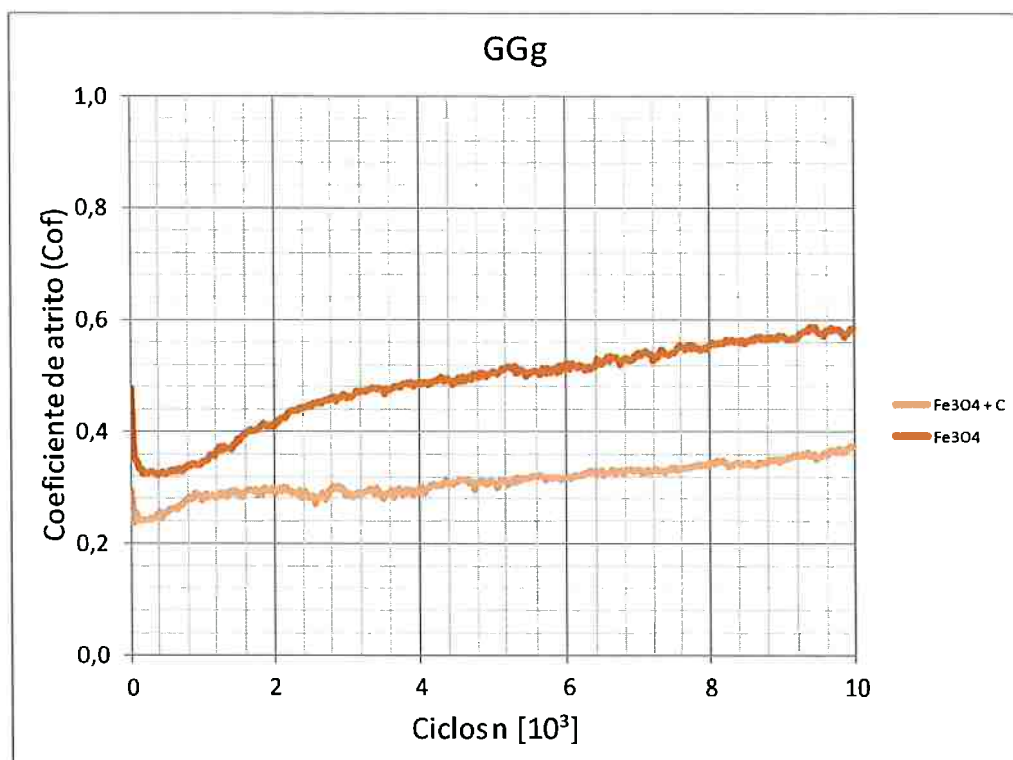


Figura 36. – Desenvolvimento do coeficiente de atrito durante os ensaios tribológicos. Amostra GGg. Nanopartículas de Fe_3O_4 e nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita.

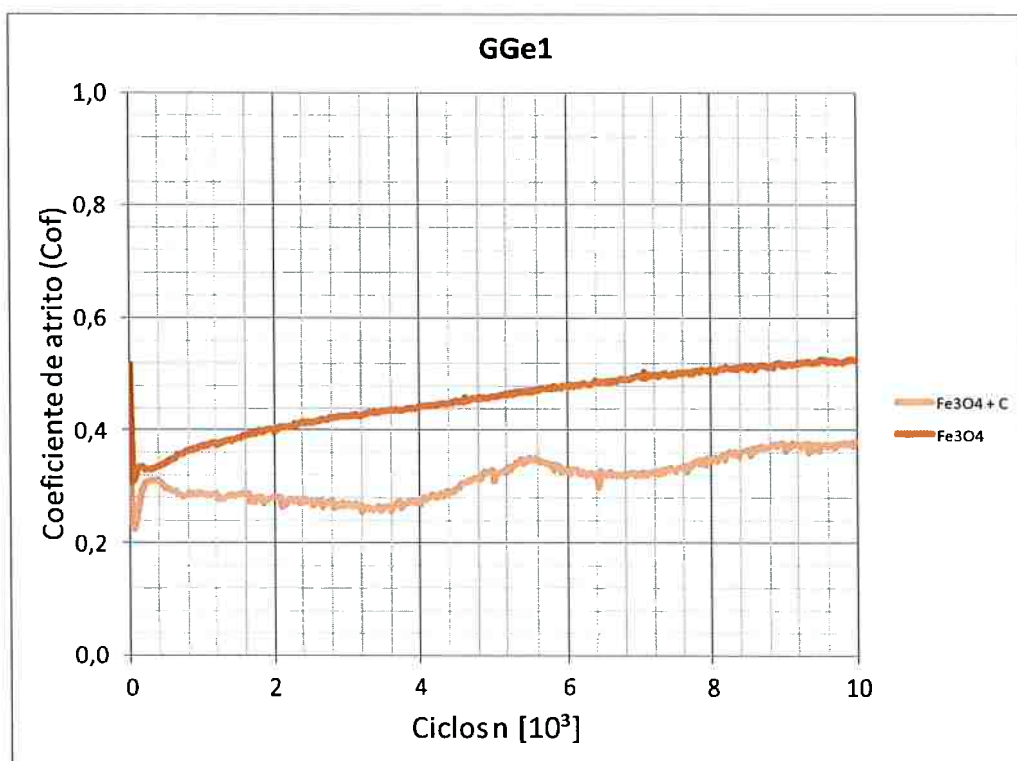


Figura 37. – Desenvolvimento do coeficiente de atrito durante os ensaios tribológicos. Amostra GGe1. Nanopartículas de Fe_3O_4 e nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita.

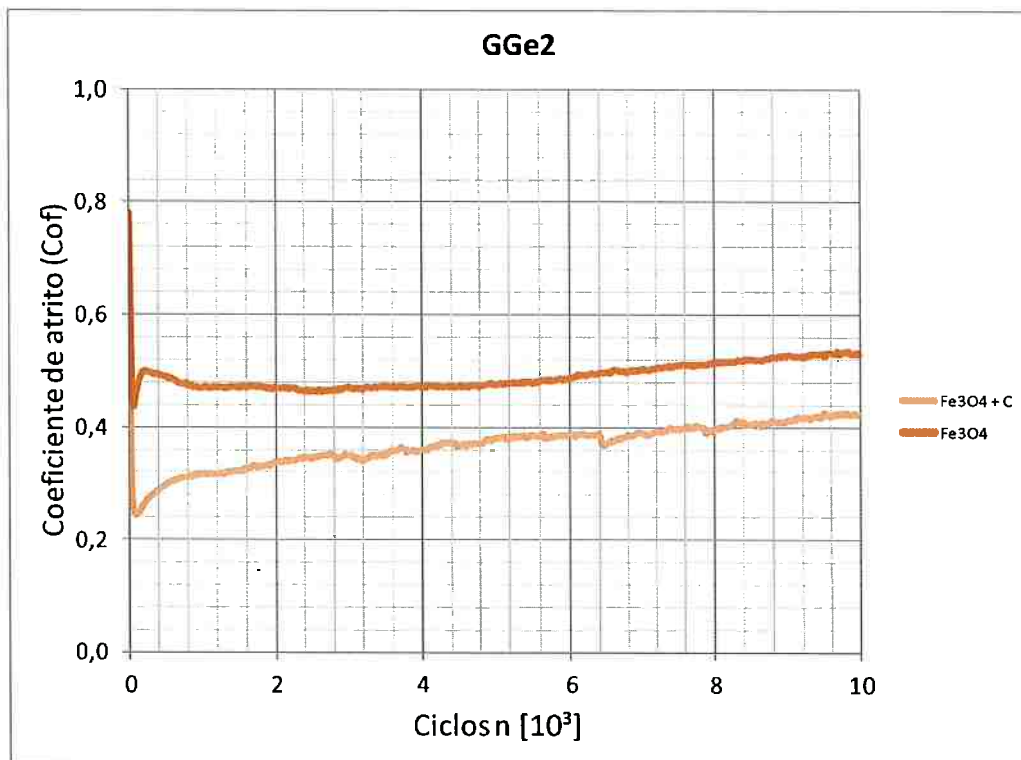


Figura 38. – Desenvolvimento do coeficiente de atrito durante os ensaios tribológicos. Amostra GGe2. Nanopartículas de Fe₃O₄ e nanopartículas de Fe₃O₄ com adição de grafita.

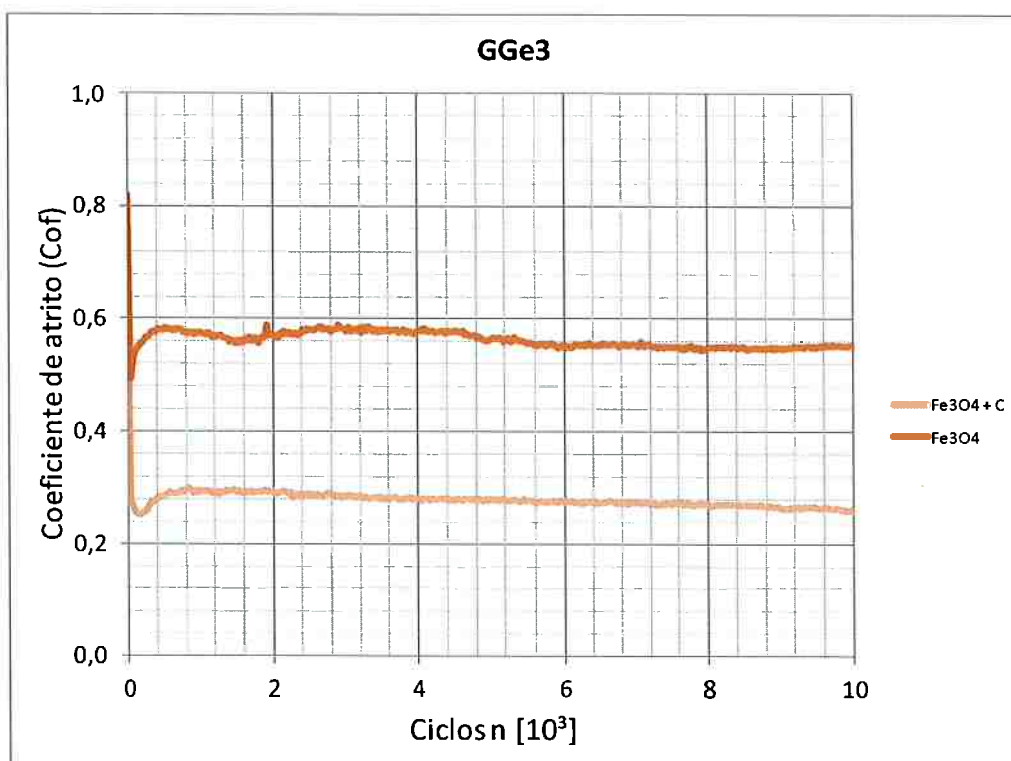


Figura 39. – Desenvolvimento do coeficiente de atrito durante os ensaios tribológicos. Amostra GGe3. Nanopartículas de Fe₃O₄ e nanopartículas de Fe₃O₄ com adição de grafita.

Em todas as amostras os coeficientes de atrito apresentaram maiores grandezas com a utilização de somente nanopartículas de Fe_3O_4 como material particulado adicionado em comparação a adição de grafita. Este fato já era esperado, pois a presença de grafita entre as superfícies de contato atenua a fricção entre os dois materiais e reduz as grandezas do coeficiente de atrito (18) (19).

Era esperado que a amostra GGe3 apresentasse o comportamento do coeficiente de atrito semelhante às outras amostras eletroerodidas (GGe1 e GGe2). Contudo esta apresentou declínio do coeficiente com o desenvolvimento dos ensaios tribológicos (figura 39). Este comportamento provocou questionamentos a respeito da possível modificação microestrutural da amostra originada pelo processo de eletroerosão. Para esta investigação foram realizadas análises por microscopias de feixe de íons focalizados (FIB) com elétrons secundários.

5.4. Microscopias de feixe de íons focalizados (FIB) das amostras

Foram realizadas análises por meio de feixe de íons focalizados (FIB) e imagens com elétrons secundários das amostras antes e posteriormente aos ensaios tribológicos com a finalidade de analisar as respectivas microestruturas e possível alteração microestrutural induzida pelo processo de eletroerosão.

5.4.1. Amostra somente lixada

A amostra de controle GGg (não submetida ao processo de eletroerosão, somente lixada – figura 40) apresentou superficialmente somente marcas de lixamento (figura 40-a), explicando o perfil topográfico superficial obtido na figura 24 (GGg pré-ensaios tribológicos). Um corte transversal foi realizado na amostra a fim de revelar a microestrutura no interior da amostra (figura 40-b), o que revelou uma matriz perlítica, constituída pela combinação lamelar entre as fases ferrita (clara) e cementita (escura).

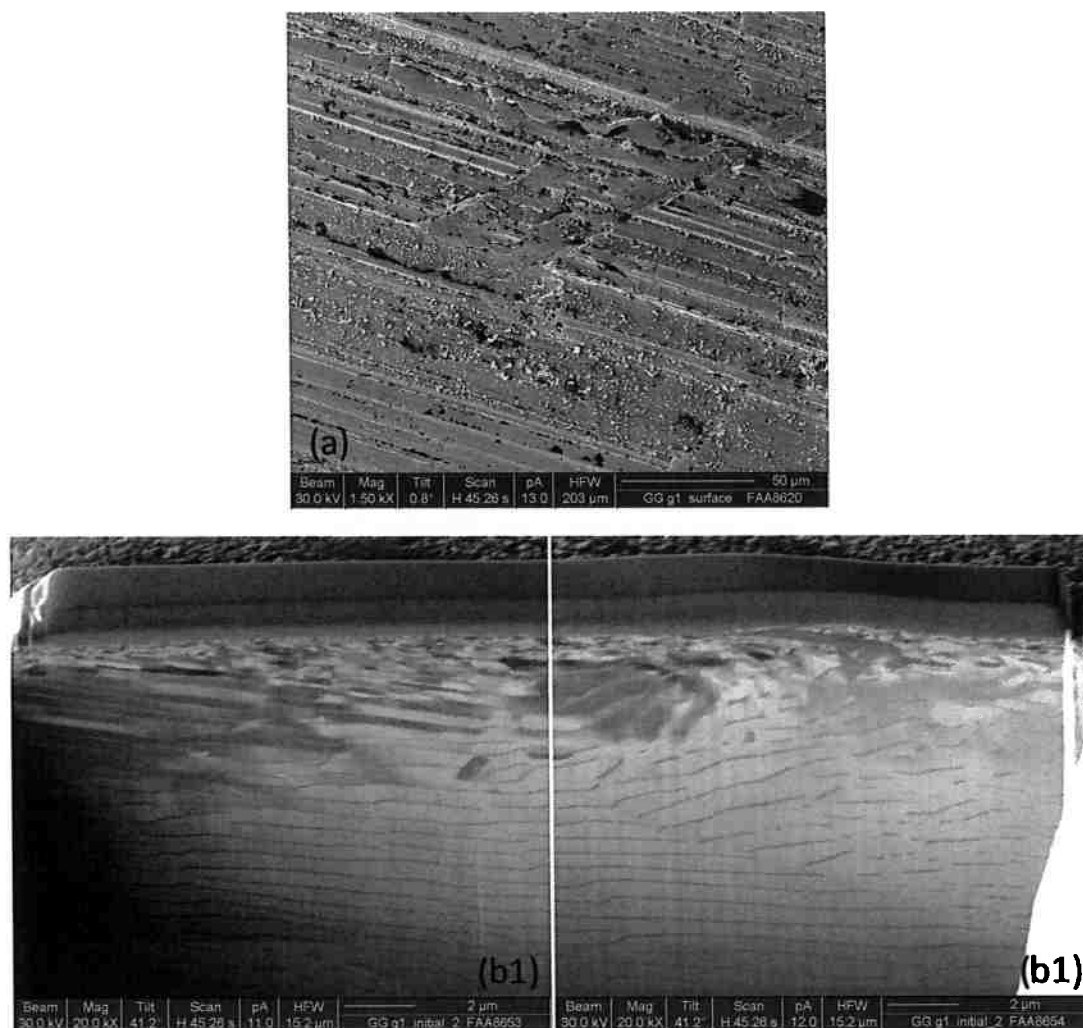


Figura 40. – Micrografias, FIB, amostra GGg (sem eletroerosão) pré-ensaio tribológico: (a) detalhe das marcas de lixa na superfície, 5.000x (b1 e b2) microestrutura perlítica, 20.000x. Matriz perlítica: ferrita (clara) e cementita (escura).

Após os ensaios tribológicos a amostra GGg (figura 41) apresentou marcas de abrasão produzidas pelo ensaio (figura 41-a.1). Na amostra que utilizou nanopartículas de $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 30\% \text{ C}$ (figura 41) é verificada a presença de tribofilme de espessura $1,75 \mu\text{m}$ (detalhe A) seguida de camada de espessura $1,00 \mu\text{m}$ que sofreu deformação plástica durante o ensaio tribológico (detalhe B). São observadas colônias de perlita de diferentes orientações (detalhe C), confirmando que a matriz desta amostra é ferro fundido cinzento.

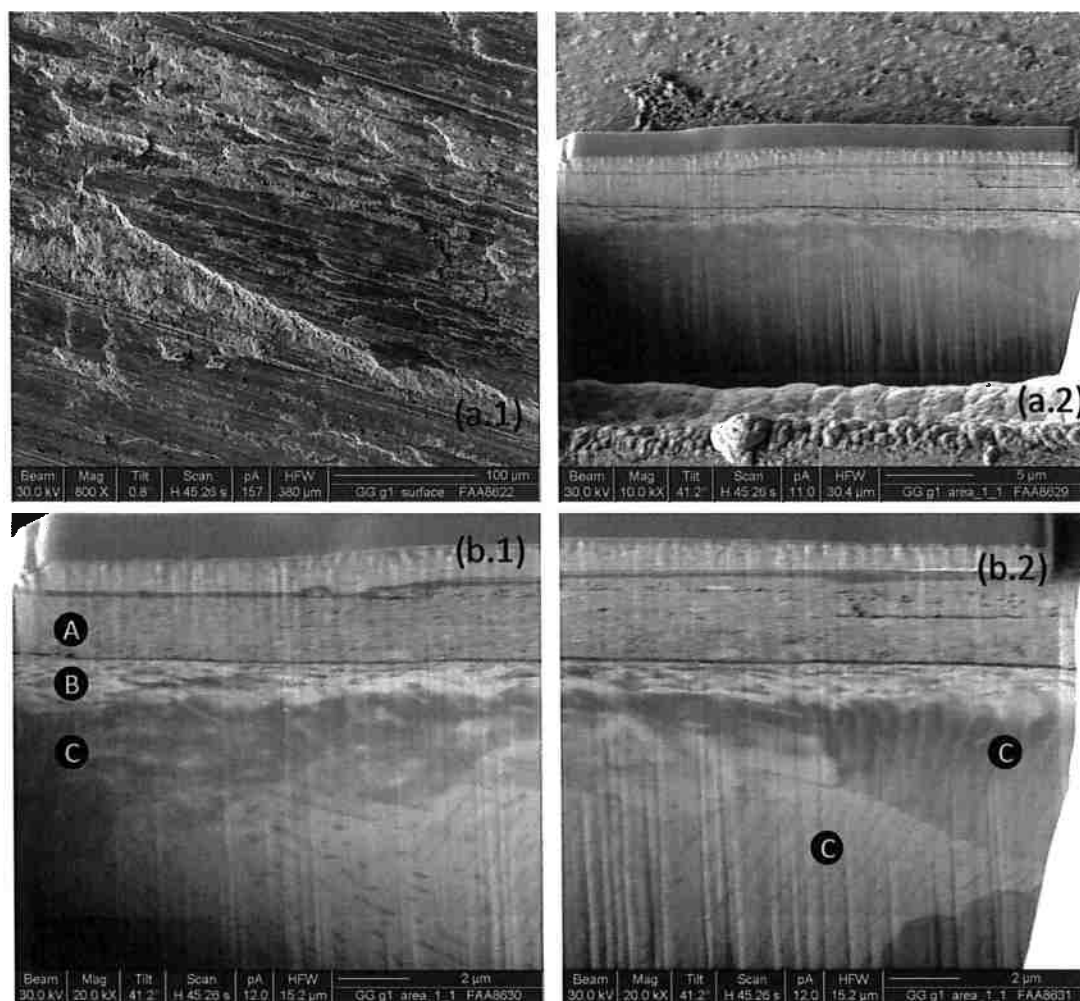


Figura 41. – Micrografias, FIB, amostra GGg (sem eletroerosão) após ensaio tribológico com material particulado de nanopartículas de $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 30\% \text{C}$: (a.1) detalhe das marcas de abrasão na superfície 800x, (a.2) visão geral do corte da amostra 10.000x, (b1 e b2) microestrutura perlítica com diferentes colônias, 20.000x.

Na amostra que utilizou somente nanopartículas de Fe_3O_4 (figura 42) é verificada a presença de tribofilme de espessura $1,25 \mu\text{m}$ (detalhe A) seguida de camada de espessura $5 \mu\text{m}$ que sofreu deformação plástica durante o ensaio tribológico (detalhe B). A utilização de somente nanopartículas de Fe_3O_4 , como material particulado apresenta espessura menor do tribofilme em relação à utilização de nanopartículas de Fe_3O_4 em adição com 30% de grafita. Há presença de um veio

de grafita (detalhe C) na matriz de microestrutura perlítica (detalhe D), novamente concluindo que a matriz do material é ferro fundido cinzento.

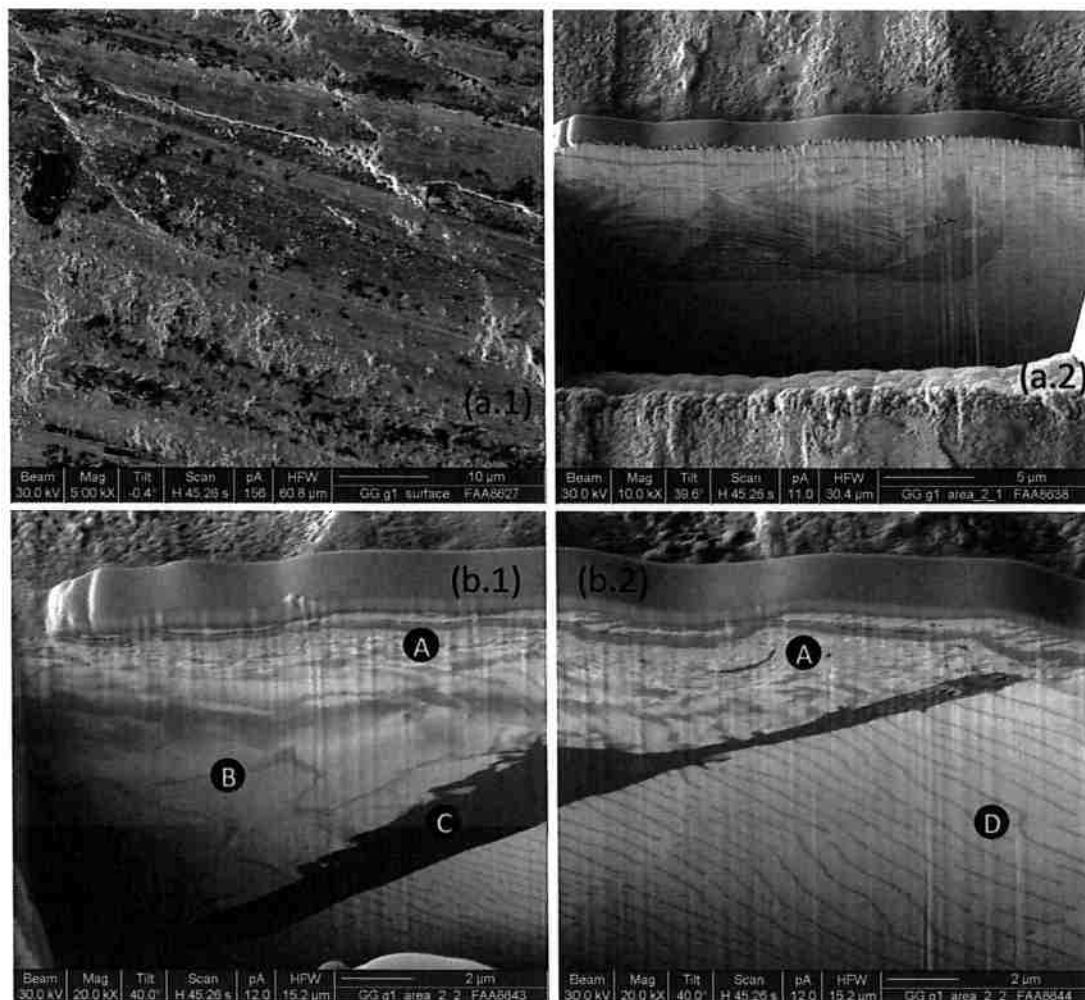


Figura 42. – Micrografias, FIB, amostra GGg (sem eletroerosão) após ensaio tribológico com material particulado de nanopartículas de Fe_3O_4 : (a.1) detalhe das marcas de abrasão na superfície 5.000x, (a.2) visão geral do corte da amostra 10.000x, (b1 e b2) microestrutura perlítica com veio de grafita, 20.000x.

5.4.2. Amostras com processo de eletroerosão (EDM submerso)

A amostra submetida ao processo de eletroerosão GGel (figura 43) apresenta superficialmente, antes dos ensaios tribológicos, poças de fusão e pequenas estruturas solidificadas sobrepostas na forma de bolhas resultantes do processo de

eletroerosão (figura 43-a.1), explicando o perfil topográfico superficial obtido na figura 25 (GGe1 pré-ensaios tribológicos) com pequenos picos e maior quantidade de vales. As marcas de lixa presentes na amostra GGg não são verificadas neste caso. Um corte transversal foi realizado na amostra e novamente são observadas diferentes colônias de microestrutura perlítica presentes na matriz (detalhe A), com presença de um veio transversal de grafita (detalhe C). Embora seja possível notar uma pequena zona coquilhada de 0,5 μm (detalhe B), este aumento do microscópio não é satisfatório para distinguir sua microestrutura, assim, não ocorreram alterações expressivas da microestrutura nesta primeira amostra que foi eletroerodida (GGe1) em comparação com a amostra somente lixada GGg.

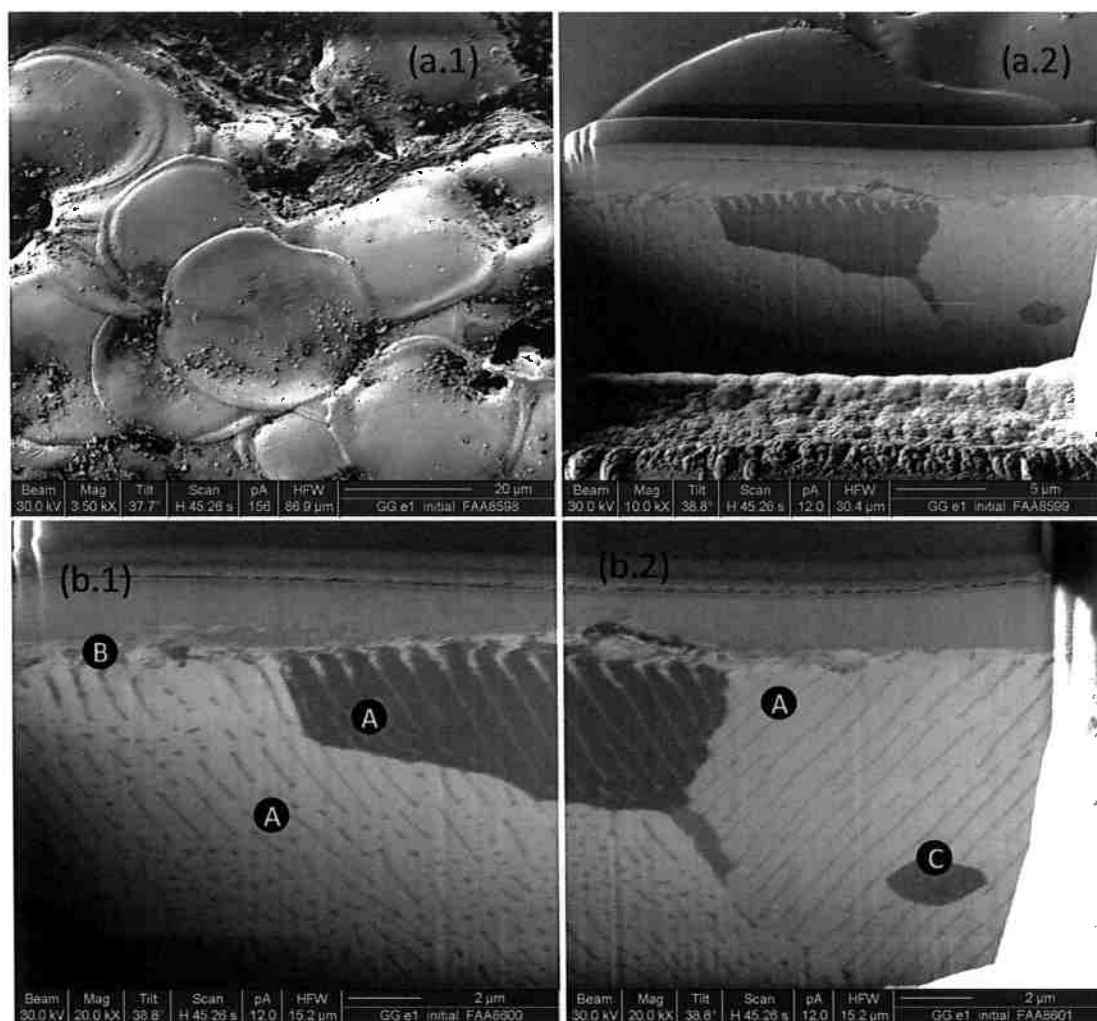


Figura 43. – Micrografias, FIB, amostra GGe1 (com processo de eletroerosão) antes do ensaio tribológico: (a.1) detalhe da superfície, poças de fusão 3.500x, (a.2) visão geral do corte da amostra 10.000x, (b1 e b2) microestrutura perlítica, com veio de grafita, 20.000x.

Após a amostra GGe1 (figura 44) ser submetida ao ensaio tribológico utilizando Fe_3O_4 em adição com grafita como material particulado, marcas de abrasão são verificadas na superfície (figura 44-a.1). É notada a presença pontual de trincas e acúmulo material refundido de espessura máxima 3,25 μm (detalhe A) em forma de domos invertidos no interior da matriz da amostra. Não há formação de tribofilme superficial, deixando exposta a superfície livre da amostra, explicando o perfil topográfico superficial obtido na figura 32 (GGe1 após os ensaios

tribológicos) com picos similares a amostra pré-ensaio e maior abundância de vales profundos. Nesta amostra também é encontrada uma zona coquilhada (detalhe B) de espessura $1,25\ \mu\text{m}$, sem microestrutura definida neste aumento do microscópio. São observadas colônias de perlita de diferentes orientações (detalhe C), confirmando que a matriz desta amostra é ferro fundido cinzento.

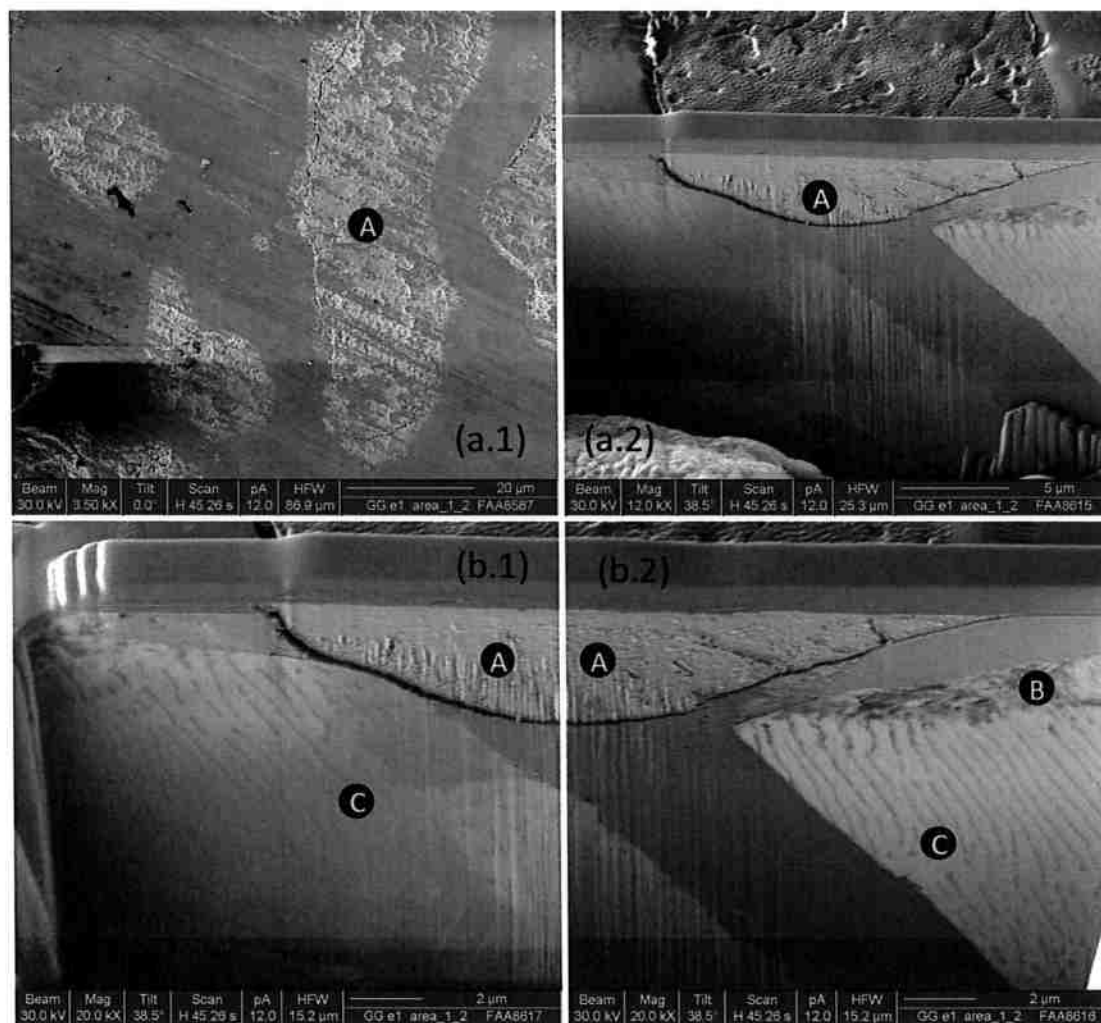


Figura 44. – Micrografias, FIB, amostra GGe1 (com processo de eletroerosão) após ensaio tribológico com material particulado de nanopartículas de $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 30\% \text{C}$: (a.1) detalhe da superfície, marcas de abrasão do ensaio tribológico, 3.500x, (a.2) visão geral do corte da amostra 12.000x, (b1 e b2) microestrutura perlítica com veio de grafita, 20.000x.

Na amostra GGe1 que utilizou somente nanopartículas de Fe_3O_4 (figura 45) marcas de abrasão são verificadas na superfície (figura 45-a.1). É notada novamente

a presença de material refundido de espessura máxima 2,25 μm (detalhe A) em forma de domo invertido. Neste caso também não há formação de tribofilme na superfície livre da peça, somente nas proximidades destes domos invertidos e também a utilização de somente nanopartículas de Fe_3O_4 , como material particulado apresentou espessura menor do tribofilme em relação à utilização de nanopartículas de Fe_3O_4 em adição com 30% de grafita. São observadas colônias de perlita de diferentes orientações (detalhe B), confirmando que a matriz desta amostra é ferro fundido cinzento embora tenham aparência distinta das colônias presentes nas amostras tipo GGg. . Há presença de um veio de grafita (detalhe C) na matriz.

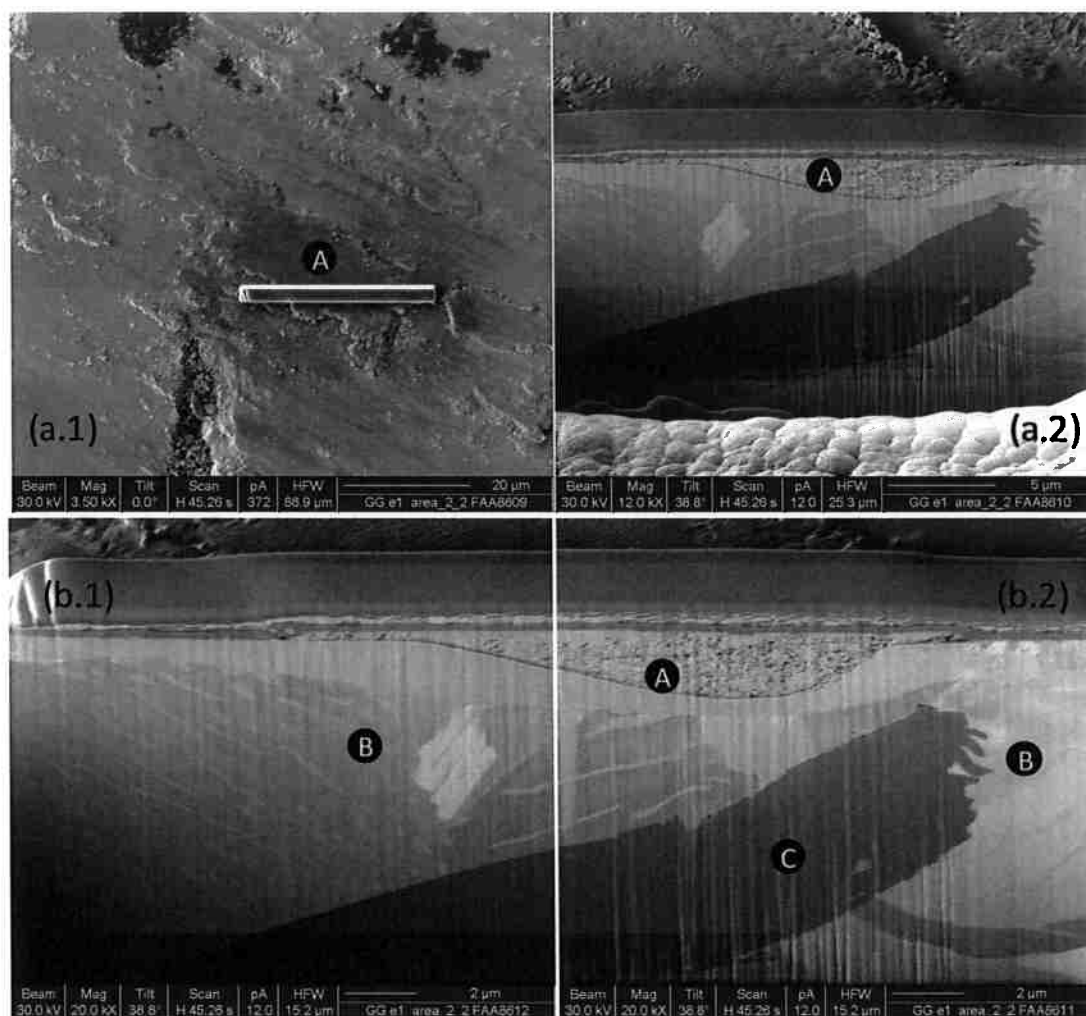


Figura 45. – Micrografias, FIB, amostra GGe1 (com processo de eletroerosão) após ensaio tribológico com material particulado de nanopartículas de Fe_3O_4 : (a.1) detalhe da superfície, marcas de abrasão do triboteste, 3.500x, (a.2) visão geral do corte da amostra 12.000x, (b1;b2) microestrutura perlítica com veio de grafita, 20.000x.

Pela presença da zona coquilhada nas amostras tipo GGe1 suspeita-se que durante o processo de eletroerosão, tenham ocorrido fusão incipiente seguida de rápido resfriamento e solidificação na superfície destas amostras. Assim o processo de eletroerosão teria transferido energia suficiente para a fusão superficial do material. A fim de averiguar esta hipótese a amostra tipo GGe3 foi analisada, tendo em vista que a mesma foi submetida ao processo de eletroerosão com maior intensidade.

A amostra submetida ao processo de eletroerosão mais intenso GGe3 (figura 46) apresenta superficialmente, antes dos ensaios tribológicos, poças de fusão e grandes estruturas solidificadas na forma de bolhas resultantes do processo de eletroerosão (figura 46-a.1), explicando o perfil topográfico superficial uniforme obtido na figura 24 (GGe3 após ensaios tribológicos) com grandes picos e vales medianos. As marcas de lixa presentes na amostra GGg não são verificadas neste caso. O corte transversal realizado na amostra (figura 46-a.2) revelou a presença de estruturas dendríticas na matriz da amostra (detalhe B e C), fato confirmando com a utilização de maior magnitude de aumento (figuras 46-b.1 e 46-b.2). A visão geral do corte transversal da amostra (figuras 46-c.1 e 46-c.2) confirma a presença da microestrutura dendrítica em toda a matriz da amostra GGe3.

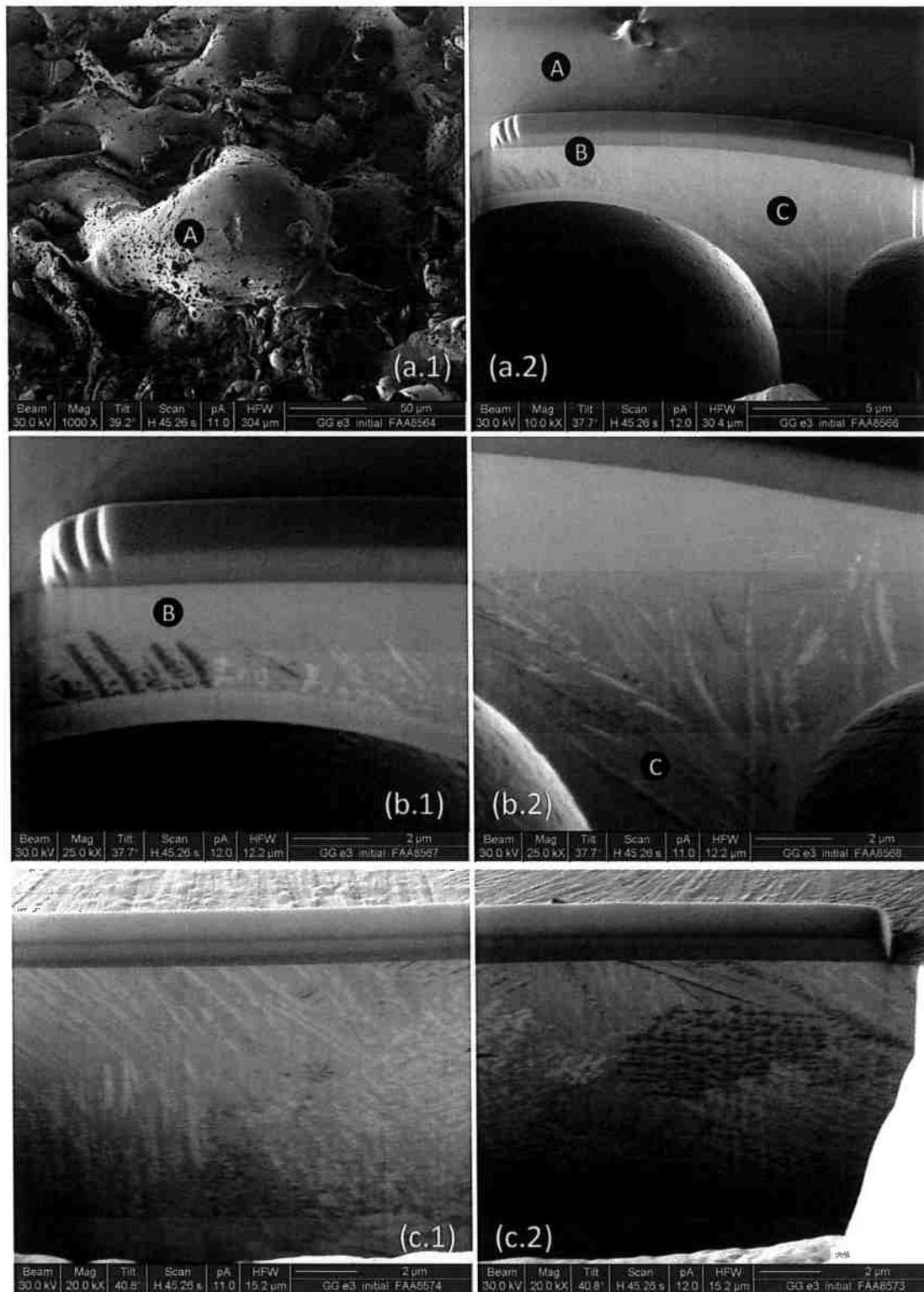


Figura 46. – Micrografias, FIB, amostra GGe3 (com processo de eletroerosão) pré-ensaio tribológico: (a.1) detalhe da superfície, poças de fusão e bolhas solidificadas resultantes do processo de eletroerosão 1.000x, (a.2) visão geral do corte da amostra, presença de dendritas, 10.000x, (b1;b2) detalhe da microestrutura dendrítica, 25.000x, (c.1;c.2) visão geral da microestrutura dendrítica 20.000x.

Após a amostra tipo GGe3 ser submetida ao ensaio tribológico utilizando de Fe_3O_4 (figura 47) com adição de grafita como material particulado, marcas de abrasão são verificadas na superfície das estruturas solidificadas na forma de bolhas (figura 47-a.1 – detalhe A). Não há formação de tribofilme (figura 47-a.2), deixando exposta a superfície livre da amostra, explicando o perfil topográfico superficial obtido na figura 34 (GGe3 pós-ensaios tribológicos) com grandes picos e vales distribuídos de maneira uniforme. O corte transversal realizado na amostra (figura 47-b.1 e 47-b.2) revelou novamente a presença de estruturas dendríticas em toda a matriz da amostra (detalhe B).

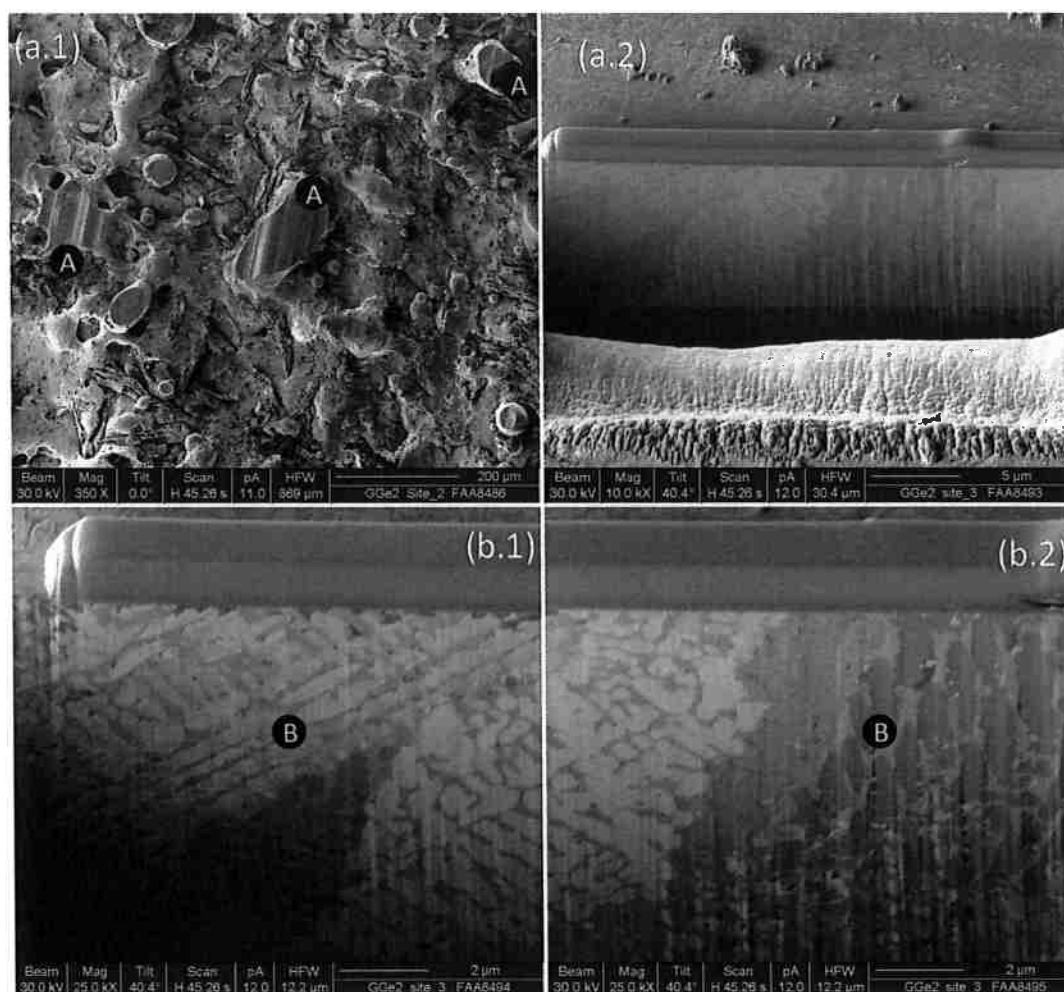


Figura 47. – Micrografias, FIB, amostra GGe3 (com processo de eletroerosão) pós-ensaio tribológico com material particulado de nanopartículas de Fe_3O_4 + 30% C: (a.1) detalhe da superfície, bolhas solidificadas resultantes do processo de eletroerosão com marcas de abrasão, 300x, (a.2) visão geral do corte da amostra, presença de dendritas 10.000x, (b1;b2) detalhe da microestrutura dendrítica, 25.000x.

Na amostra GGe3 que utilizou somente nanopartículas de Fe_3O_4 (figura 48) marcas de abrasão são novamente verificadas somente na superfície das estruturas solidificadas na forma de bolhas (figura 48-a – detalhe A). Assim como no caso da amostra que utilizou nanopartículas de Fe_3O_4 em adição com 30% de grafita, esta amostra (sem adição de grafita) não apresentou formação de tribofilme (figura 48-b.1 e 48-b.2), deixando novamente exposta a superfície livre da amostra, explicando os perfis topográficos superficiais semelhantes obtidos na figura 31 (GGe3 pós-ensaios tribológicos), com grandes picos e vales distribuídos de maneira uniforme

para ambos os tipos de materiais particulados. O corte transversal realizado nesta amostra (figura 48-b.1 e 48-b.2) revelou também a presença de estruturas dendríticas em toda a matriz da amostra (detalhe B).

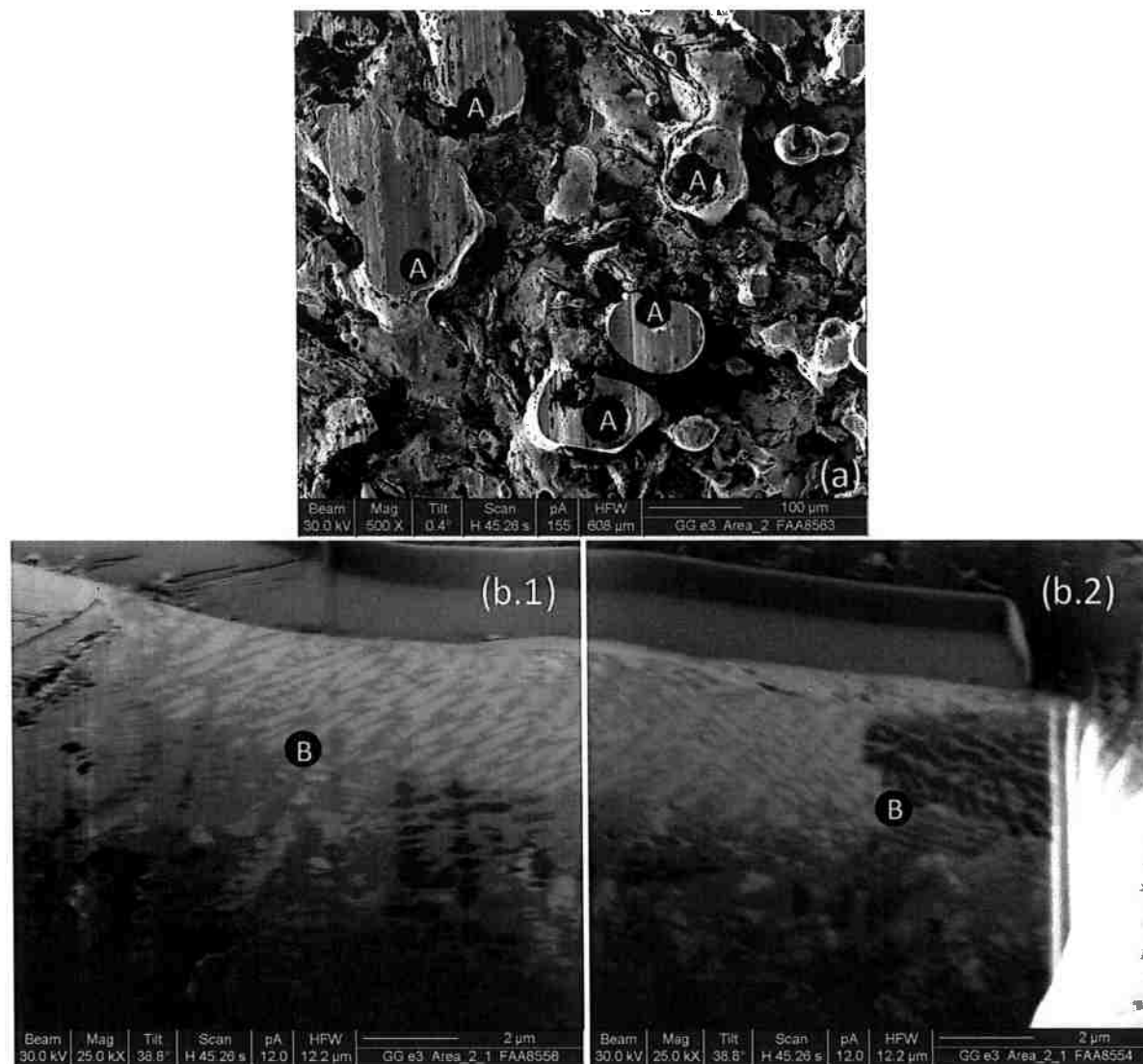


Figura 48. – Micrografias, FIB, amostra GGe3 (com processo de eletroerosão) pós-ensaio tribológico com material particulado de nanopartículas de Fe_3O_4 : (a) detalhe da superfície, bolhas solidificadas resultantes do processo de eletroerosão com marcas de abrasão 500x, (b1;b2) detalhe da microestrutura dendrítica; 25.000x.

Considerando-se que o processo de eletroerosão não foi aplicado nas amostras originais GGg, a não ocorrência de transformações microestruturais nestas amostras após o ensaio tribológico e a ocorrência de alterações importantes de

microestrutura nas amostras eletroerodidas, é possível concluir que o processo de eletroerosão provavelmente foi o agente determinante desta alteração microestrutural (perlítica/dendrítica). É provável que o processo de eletroerosão seja capaz de transferir para a matriz das amostras energia suficiente para fusão incipiente do material. Esta transferência ocorre de maneira focada e concentrada dada a natureza de feixe do processo, possibilitando o rápido aquecimento da área de influência do feixe, seguido de rápido resfriamento com o deslocamento deste. Assim grandes gradientes de aquecimento e resfriamento são gerados na passagem do feixe pela superfície do material.

Estes fatos resultam nas características superficiais das amostras eletroerodidas analisadas, seja pelas poças de fusão ou estruturas solidificadas em formato de bolhas, bem como pelas alterações microestruturais das zonas coquilhadas e transformações microestruturais com advento de dendritas na matriz.

6. Discussões Finais

A técnica de eletroerosão foi capaz de alterar o perfil topográfico superficial das amostras de ferro fundido cinzento analisadas, com base nos perfis crescentes de rugosidade obtidos (figura 30). Após os ensaios tribológicos (amostras planas contra anéis de aço), independente do tipo de material particulado adicionado (nanopartículas de Fe_3O_4 ou Fe_3O_4 com adição de grafita) a rugosidade das amostras foi reduzida (figura 35).

Os coeficientes de atrito observados durante os ensaios tribológicos das quatro amostras nos 5 (cinco) mil últimos ciclos de translação apresentaram menores desvios padrões comparados com os desvios padrões dos ensaios completo de 10 (dez) mil ciclos de translação. É provável que este fenômeno ocorra devido à uniformização da superfície com o crescimento de ciclos. Nos primeiros ciclos (0 a 5 mil ciclos) a superfície de contato entre os discos de ferro fundido e os anéis de aço é muito irregular. O material particulado (Fe_3O_4 ou Fe_3O_4 com adição de grafita) passa a preencher estas irregularidades (vales) e em conjunto com o desgaste superficial dos picos, reduz a variação (desvio padrão) do coeficiente de atrito entre as superfícies. Com a continuidade dos ensaios tribológicos, forma-se o tribofilme (material particulado em conjunto com material de desgaste superficial), que diminuiu em maior intensidade esta variação do coeficiente de atrito entre as duas superfícies.

Os ensaios tribológicos com material particulado de nanopartículas de Fe_3O_4 apresentaram maiores grandezas do coeficiente de atrito em comparação com o teste utilizando nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita.

A caracterização microestrutural utilizando FIB (figuras 40 a 42), revelou que as amostras somente lixadas possuem matrizes perlíticas compostas de colônias com diferentes orientações e veios de grafita dispersos, caracterizando estas como amostras de ferro fundido cinzentas. Há presença de camada que sofreu deformação plástica após os ensaios tribológicos. Alterações de fases são ausentes nestas amostras não eletroerodidas.

A caracterização microestrutural utilizando FIB (figuras 43 a 45) da amostra submetida ao processo de eletroerosão mais brando, revelou matrizes perlíticas semelhantes às amostras lixadas, caracterizando estas como amostras de ferro fundido cinzentas. Há presença de pequenas estruturas solidificadas sobrepostas na forma de bolhas resultantes do processo de eletroerosão. São observadas zonas coquilhadas superficiais nestas amostras eletroerodidas, contudo pelo aumento utilizado não foi possível identificação microestrutural. Portanto novamente não são observadas alterações de fases relevantes. Pela presença destas zonas coquilhadas suspeitou-se que durante o processo de eletroerosão, tenham ocorrido fusão incipiente seguida de rápido resfriamento e solidificação na superfície destas amostras. Assim o processo de eletroerosão teria transferido energia suficiente para a fusão superficial do material.

Para investigação desta suposição foram realizadas caracterizações microestruturais FIB (figuras 46 a 48) das amostras submetidas ao processo de eletroerosão mais intenso. Há presença novamente de pequenas estruturas solidificadas sobrepostas na forma de bolhas resultantes do processo de eletroerosão. Os cortes transversais realizados nas amostras revelaram a presença de estruturas dendríticas nas matrizes. A microestrutura original perlítica com veios de grafita foi

transformada em ledeburita com a presença de dendritas, características relacionadas ao ferro fundido branco.

Considerando-se que o processo de eletroerosão não foi aplicado nas amostras somente lixadas e a não ocorrência de transformações microestruturais nestas amostras após o ensaio tribológico e que ocorreram alterações importantes de microestrutura nas amostras eletroerodidas, é possível concluir que o processo de eletroerosão provavelmente foi o agente determinante desta alteração microestrutural (perlítica/dendrítica). Há possibilidade de que o processo de eletroerosão tenha sido capaz de transferir para a matriz das amostras energia suficiente para fusão incipiente do material. Esta transferência ocorreu concentrada dada a natureza de feixe do processo, possibilitando o rápido aquecimento da área de influência do feixe, seguido de rápido resfriamento com o deslocamento deste. Assim as amostras eletroerodidas podem ter sido submetidas a elevados gradientes de aquecimento e resfriamento gerados na passagem do feixe nas superfícies, resultando nas características superficiais das amostras eletroerodidas analisadas, seja pelas poças de fusão ou estruturas solidificadas em formato de bolhas, bem como pelas alterações microestruturais das zonas coquilhadas e transformações microestruturais com advento de dendritas nas matrizes.

A possibilidade do processo de eletroerosão ser capaz de realizar alterações microestruturais traria um novo método de tratamento microestrutural, além de tratamento superficial. Há estudos que utilizam laser: Chen *et al* (22) e Wang *et al* (23); arcos de plasma: Yan (24) e irradiação por elétrons de alta energia: Choo *et al* (25) para este fim.

Chen *et al* (22) utilizou um laser de CO₂ para melhorar a dureza e resistência à corrosão de ferros fundidos nodulares e cinzentos. Variações na intensidade do laser e tempo de aplicação foram os parâmetros de controle para tratamento da microestrutura e resolidificação. As amostras tratadas apresentaram alta dureza (1245 HV) em até 1 mm de profundidade, além de microestrutura dendrítica metaestável com matriz austenítica, contudo os dois materiais apresentaram poros na superfície tratada. Em relação às propriedades superficiais, o processo foi capaz de reduzir a erosão após 114 horas de imersão em solução de SiO₂, contudo não apresentou alterações significativas na rugosidade superficial. A figura 49 apresenta micrografias da amostra de ferro fundido cinzento original e da amostra tratada com laser.

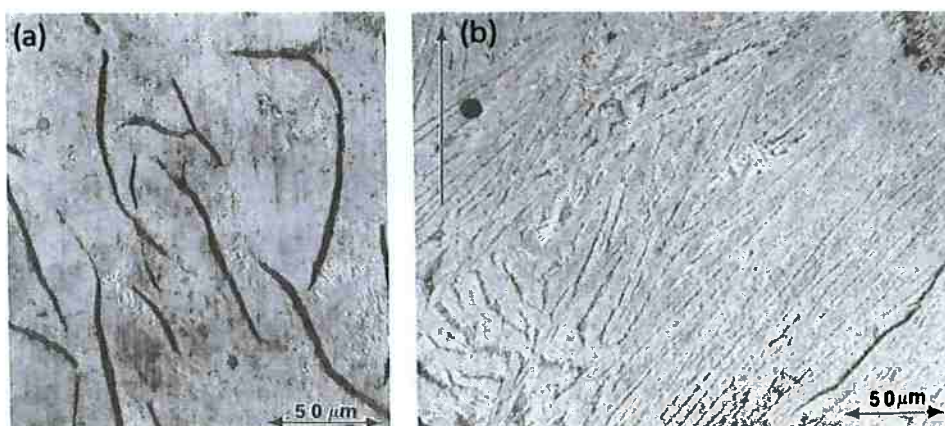


Figura 49. – Micrografias ópticas ferro fundido cinzento: (a) amostra original, (b) amostra tratada com laser (22).

Yan (24) utilizou um micro arco de plasma para investigar sua influência na microestrutura, rugosidade e resistência à corrosão em diversas ligas ferrosas e não-ferrosas. A superfície das amostras foi fundida com a passagem do arco de plasma e solidificada rapidamente por spray de água. No caso dos ferros fundidos, as camadas solidificadas das amostras tratadas apresentaram a matriz composta por ledeburita

refinada, com grande quantidade de precipitados arredondados de grafita uniformemente distribuídos na matriz. O tratamento de arco de plasma, nestes casos, melhorou significativamente a resistência ao desgaste, em especial a resistência à abrasão, devido a aumento significativo da dureza. A figura 50 apresenta micrografias de amostras tratadas com arco de plasma.

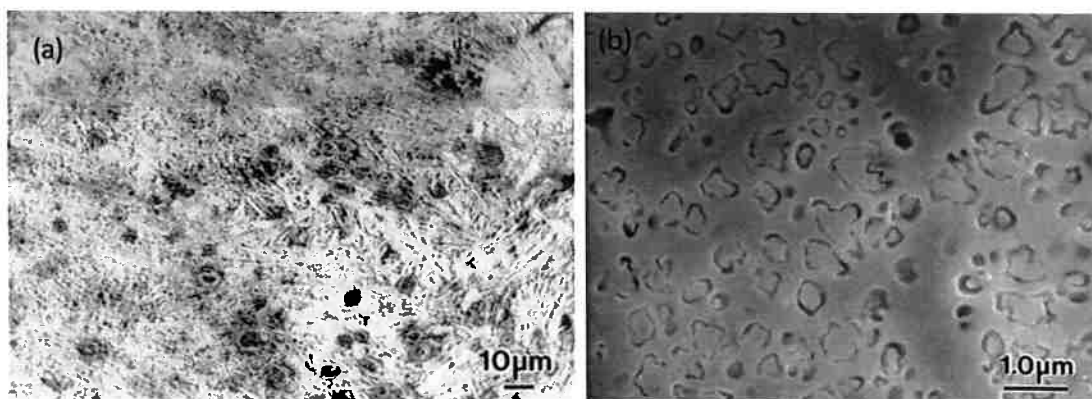


Figura 50. – Micrografias ópticas ferro fundido cinzento: (a) após tratamento de arco de plasma, (b) detalhe dos precipitados refinados de grafita (24).

Choo *et al* (25) utilizou irradiação de elétrons de alta energia em amostras de ferro fundido cinzento de matriz perlítica para estudar as respectivas consequências na dureza superficial e microestrutura das amostras. Os resultados obtidos foram o aumento da dureza superficial e melhores resistências ao desgaste, bem como importantes alterações microestruturais. As superfícies irradiadas foram aquecidas a temperaturas na região de austenita do diagrama Fe-C e então resfriadas rapidamente a temperatura ambiente. A velocidade de resfriamento obtida foi satisfatória para o endurecimento superficial através da transformação martensítica. A microestrutura original perlítica com veios de grafita foi transformada em martensita, ledeburita e austenita retida, com total ou parcial dissolução das grafitas, formando o chamado ferro fundido branco. As figuras 51 e 52 apresentam microscopias ópticas deste

ferro fundido originalmente cinzento irradiado por elétrons de alta energia. A figura 53 apresenta uma microscopia óptica de ferro fundido branco.

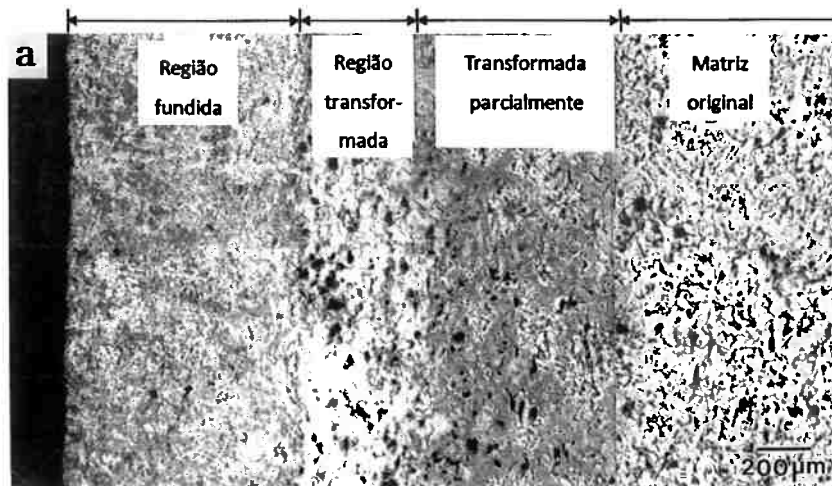


Figura 51. – Ferro fundido cinzento irradiado por elétrons de alta energia. Transformações de fase. Microscopia óptica. Adaptado de (25).

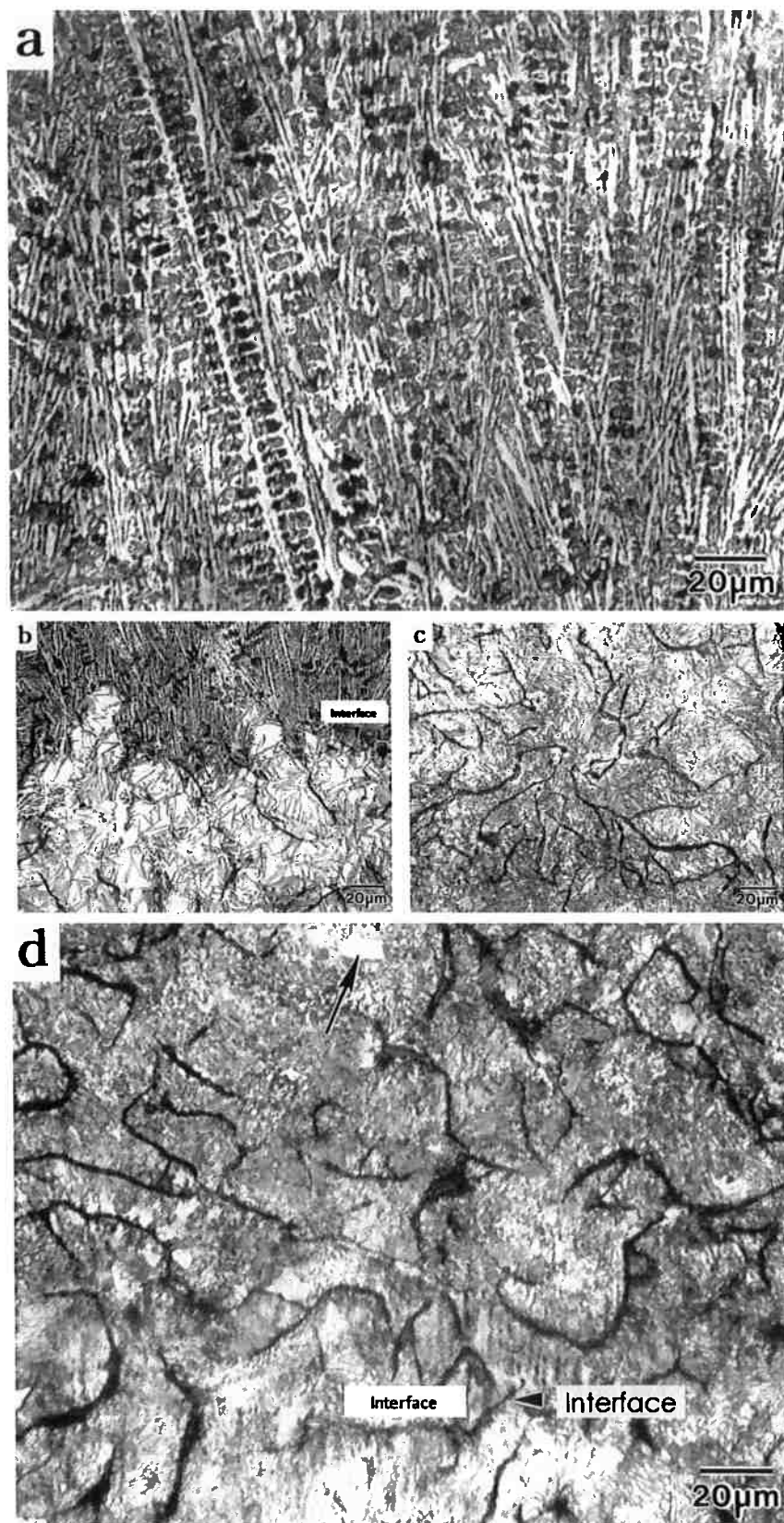


Figura 52. – Microscopia óptica de ferro fundido cinzento irradiado por elétrons de alta energia. (a) região fundida; (b) região fundida/transformada; (c) região com transformação de fase; (d) região parcialmente transformada. Adaptado de (25).

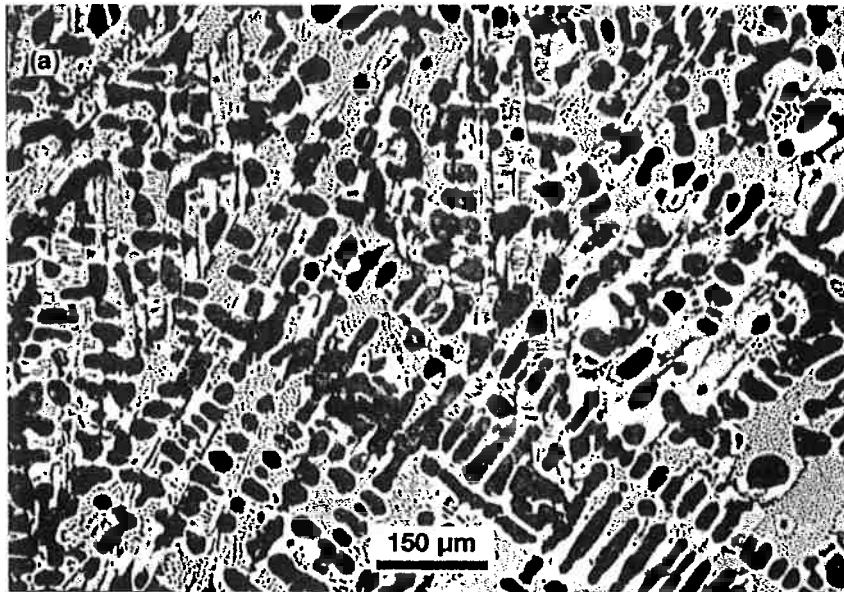


Figura 53. – Microscopia óptica de ferro fundido branco, composto por perlita (escura) e ledeburita transformada (clara): cementita (branco) e perlita (escura, pequenos pontos). Ataque Nital (26).

7. Conclusões

- O processo de eletroerosão é capaz de alterar as características de rugosidade superficial das amostras de ferro fundido cinzento.
- A utilização de nanopartículas de Fe_3O_4 nos ensaios tribológicos apresentaram maiores grandezas do coeficiente de atrito em comparação com os ensaios utilizando nanopartículas de Fe_3O_4 com adição de grafita.
- Os ensaios tribológicos induziram deformações plásticas superficiais nas amostras.
- As análises por microscopias de feixe de íons (FIB) permitem afirmar que ocorreram alterações microestruturais nas amostras tratadas superficialmente pelo processo de eletroerosão.
- As amostras planas de ferro fundido cinzento inicialmente possuíam microestrutura perlítica com a presença de veios de grafita na matriz, após o processo de eletroerosão (EDM submerso) as amostras apresentaram zonas coquilhadas superficiais, indicando a ocorrência de fusão incipiente seguida de rápida solidificação.
- Na amostra que sofreu processo de eletroerosão mais intenso, a matriz originalmente perlítica com veios de grafita, caracterizada como ferro fundido cinzento foi transformada em ledeburita com a presença de dendritas, características relacionadas ao ferro fundido branco.

8. Referências Bibliográficas

1. **Stefanescu, Doru M.** *Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys - ASM Handbook*. 10^o ed. Vol. 1. ASM International, 1990. pp. 13-88.
2. **White, Charles V.** *Gray Iron - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys - ASM Handbook*. 10^o ed. Vol. 1. ASM Internacional, 1990. pp. 38-88.
3. **Minkoff, I.** *The physical metallurgy of cast iron*. New York, Wiley, 1983.
4. **Fras, E., Górný, M. e López, H. F.** *The transition from gray to white cast iron during solidification: Part I. Theoretical background*. Vol. 36. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005. pp. 3075-3082.
5. **Fras, E., Górný, M. e López, H. F.** *The transition from gray to white cast iron during solidification: Part II. Experimental verification*. Vol. 36. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005. pp. 3083-3092.
6. **Fras, E., Górný, M. e López, H. F.** *The transition from gray to white cast iron during solidification: Part III. Thermal analysis*. Vol. 36. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005. pp. 3093-3101.
7. **Tylczak, Joseph H. e Oregon, Albany.** *Abrasive Wear - Metals handbook friction, lubrication, and wear technology*. 9^o ed. Vol. 18. ASM International, 1992. pp. 337-351.
8. **Shuck, A. B.** *A Laboratory Evaluation of Some Automotive Cast Irons*. Vol. 56^o. Trans. AFS, 1948. pp. 166-192.
9. **Benscoter, Arlan O.** *Carbon and Alloy Steels: Metallographic Techniques and Microstructures - Metallography and Microstructures - ASM Handbook*. 9^o ed. Vol. 9. ASM International, 2004. pp. 273-357.
10. **Pereira, A. A.** *Análise do desgaste da ferramenta à base de B-Si₃N₄ na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 utilizando técnicas avançadas e de alta resolução*. Florianópolis, 2010. Tese de Doutorado.
11. **Rajurkar, K. P., Kozak, J. e Chatterjee, A.** *Nonabrasive Finishing Methods - Surface Engineering - ASM Handbook*. Vol. 5. ASM International, 1994. pp. 110-117.
12. **Atefi, R., et al.** *The Influence of EDM Parameters in Finishing Stage on Surface Quality, MRR and EWR*. Vol. 4. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2012. pp. 1287-1294.
13. **Sodick.** *Catálogo 5^o Geração EDM Linear*.
14. **Jenoptik.** *Catálogo Roughness measuring systems*. 10/2008.

15. **Axén, N., Hogmark, S. e Jacobson, S.** *Friction and Wear Measurement Techniques - Modern Tribology Handbook*. CRC Press LLC, 2001. pp. 493-508.
16. **Kato, K. e Adachi, K.** *Wear Mechanisms - Modern Tribology Handbook*. CRC Press LLC, 2001. pp. 273-300.
17. **Bonny, K., et al.** *Influence of the electrial discharge machining on sliding friction and wear of WC-Ni cemented carbide - Tribology International*. Vol. 43. Elsevier Ltd., 2010. pp. 2333-2344.
18. **Volkert, C. A. e Minor, A. M.** *Focused Ion Beam Microscopy and Micrimachining*. Vol. 32. MRSBulletin, 2007. pp. 389-395.
19. **Uchic, M. D.** *Serial Sectioning Methods for Generating 3D Characterization Data of Grain- and Precipitate-Scale Microstructures - Computational Methods for Microstructure-Property Relationships*. Springer US, 2011. pp. 31-52.
20. **Wood, Robert J K.** *Tribo-corrosion of coatings: a review*. Vol. 40. Journal of physics. D, Applied physics, 2007. pp. 5502-5521.
21. **Prasad, B. K., et al.** *Effects of some solid lubricants suspended in oil toward controlling the wear performance of a cast iron*. Vol. 132. Journal of tribology, 2010. p. 41602.
22. **Chen, C. H. e Altstetter, C. J.** *Laser Processing of Cast Iron for Enhanced Erosion Resistance*. Vol. 15A. Metallurgical Transactions A, 1984. pp. 719-728.
23. **Wang, H. M. e Bergmann, H. W.** *Rapid Graphitization of a Pulsed Laser Remelted Cuctile Cast Iron during Multipass Overlap Melting*. Vol. 26A. Metallurgical and Materials Transactions A, 1995. pp. 793-800.
24. **Yan, M.** *Micro-beam plasma-arc surface processing for ferrous and nonferrous metals*. Vol 38. Journal of Materials Science, 2003. pp. 3219-3222.
25. **Choo, S. H., Lee, S. e Kwon, S. J.** *Surface hardening of a gray cast iron used for a diesel engine cylinder block using high-energy electron beam irradiation*. Vol. 30A. Metallurgical and Materials Transactions. 1999. pp. 1211-1221.
26. **Colpaert, H.** *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. 4º ed. Edgard Bulcher, 2008. pp. 549-622.